

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra mechanické technologie



**Mechanické vlastnosti svarových spojů oceli
7CrMoVTiB10-10**

**Mechanical properties welding joints for steel
7CrMoVTiB10-10**

Student:

Vedoucí diplomové práce:

Bc. Ondřej Bečica

doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D

Ostrava 2009

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Ondřej Bečica

Studijní program:

N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

2303T002 Strojírenská technologie

Téma:

Mechanické vlastnosti svarových spojů oceli 7CrMoVTiB10-10

Mechanical Properties Welding Joints for Steel 7CrMoVTiB10-10

Zásady pro vypracování:

1. Proved'te posouzení svařitelnosti 7CrMoVTiB10-10 a rozbor disperzních částic, vyskytujících se u nízkoaligovaných žárovevých ocelí.
2. Navrhněte postup svařování trubek z oceli 7CrMoVTiB10-10.
3. Navrhněte a proved'te tepelné zpracování svarových spojů.
4. Vyhodno'te svarové spoje z hlediska metalografie, měření a tvrdosti a mikrotvrdosti přes svarové spoje.
5. Vyhodno'te dosažené výsledky.

Seznam doporučené odborné literatury:

MOHYLA, P. Nové poznatky v oblasti výzkumu moderních žárovevých ocelí.

In: *TechMat 05. Svitavy 4. listopadu 2005*, Pardubice: Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, 2005, s.17-21. ISBN 80-7194-803-9.

MOHYLA, P. KOUKAL, J. Vliv makrostruktury na mechanické vlastnosti svarových spojů oceli T24. In: *Nové materiály technologie a zařízení pro svařování. Ostrava 19.-21. září 2005*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, ČSÚ Ostrava, 2005, s. 175–180. ISBN 80-248-0898-6.

KUČERA, J. Nízkoaligované žárovevne oceli. *Teorie svařování*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 1991. s. 261-263.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.**


Konzultant diplomové práce: **Bc. Jiří Hlavatý**

Datum zadání: 29.09.2008

Datum odevzdání: 22.05.2009




prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.
vedoucí katedry


prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta:

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 26. 4. 2009

.....

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména § 35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 - školní dílo.
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB – TUO) ukládá jeden výtisk k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce.
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB – TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB – TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

V Ostravě dne 26. 4. 2009

.....

Bc. Ondřej Bečica

Stará Ves nad Ondřejnicí, Košatka

Oderská 114

739 23

Anotace Diplomové práce

BEČICA, O. *Mechanické vlastnosti svarových spojů oceli 7CrMoVTiB10-10*.

Ostrava: Katedra mechanické technologie - 345, fakulta strojní VŠB – TU Ostrava, 2009.

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D

Diplomová práce se zabývá problematikou svařitelnosti nízkolegované žárovevné oceli T24, rozbořem disperzních částic a výslednými mechanickými vlastnostmi svarových spojů.

V úvodu je popsáno použití a princip žárovevnosti nové oceli T24, poté je rozpracována problematika svařitelnosti, rozbořy disperzních částic a návrh zkušebních svarových spojů trubek s návrhem vhodných parametrů svařování. Dále je zde navrženo optimální tepelné zpracování svarových spojů za účelem dosažení vyhovujících mechanických vlastností

V závěru je zpracováno vyhodnocení svarových spojů z hlediska svařitelnosti, nejvýhodnějších dosažených struktur potvrzených metalografickým rozbořem a zkouškami tvrdosti.

Annotation of Master thesis

BEČICA, O. *Mechanical Properties Welding Joints for Steel 7CrMoVTiB10-10*. Ostrava: Department of Mechanical Technology - 345, Faculty of Mechanical Engineering, VŠB – TU Ostrava, 2009.
Master Thesis Supervisor: doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D

This master thesis deals with weldability of Cor-Ten creep-resisting steel T24, provides analysis of dispersive particles, and consequent mechanical properties of welded joints.

The introduction describes the use and principle of creep-resistance of the new T24 steel. The issue of weldability is further discussed together with analyses of dispersive particles and the proposal of welded tubes' joints including the suggestion of optimal welding parameters. Furthermore, the optimal thermal processing leading to the best possible mechanical performance of welded joints is drafted.

The conclusion of the thesis addresses the outcomes of analysis of welded joints from the point of weldability, optimal structure certified by metallographical analysis and hardness tests.

Obsah

Seznam použitého značení a zkratk.....	8
1. Úvod.....	9
2. Všeobecná charakteristika žárovevných ocelí	10
3. Mechanizmy zpevnění a degradační procesy žárovevných ocelí	11
3.1 Typ krystalické mřížky	12
3.2 Substituční a intersticiální zpevnění	12
3.3 Disperzní částice	12
3.4 Degradační procesy	13
4. Vliv mikrostruktury nízkoleg. ocelí na žárovevnost	14
5. Rozdělení žárovevných ocelí	15
6. Charakteristika nízkolegované oceli 7CrMoVTiB10-10.....	19
7. Posouzení svařitelnosti	20
8. Rozbor disperzních částic	22
9. Postup svařování trubek	24
9.1 Záznam svařování trubky č. 1	25
9.2 Záznam svařování trubky č. 2	26
9.3 Záznam svařování trubky č. 3	27
9.4 Záznam svařování trubky č. 4	28
10. Návrh tepelného zpracování	29
11. Příprava vzorků pro metalograf. rozbor a mechanické zkoušky	30
11.1 Příprava vzorků pro zkoušky makrostruktury	30
11.2 Příprava vzorků pro zkoušky mikrostruktury a mikrotvrdosti	31
11.3 Příprava vzorků pro zkoušky tvrdosti HV 10.....	31
11.4 Příprava vzorků pro zkoušky rázem v ohybu	31
12. Vyhodnocení svarových spojů oceli 7CrMoVTiB10-10	32
12.1 Vzorek 1.1	32
12.2 Vzorek 2.1	35
12.3 Vzorek 3.1	38
12.4 Vzorek 4.1	41
12.5 Zkoušky rázem v ohybu	44
13. Diskuse dosažených výsledků	45
14. Závěr	47
15. Použitá literatura	48

Seznam použitého značení a zkratk

Ac1	Teplota začátku austenitické přeměny	[°C]
ARA	Anizotermický rozpad austenitu	
GTAW (141)	Gas Tungsten Arc Welding	
HV 10 -	Tvrdost dle Vickerse při zatížení 10 KG (98,1 N)	
HV 0.1	Tvrdost dle Vickerse při zatížení 0,1 KG (0,89 N)	
KCV	Vrubová houževnatost	[J.cm ⁻²]
KV	Typ tyče pro zkoušku rázem v ohybu	
Re	Mez kluzu	[MPa]
Rm	Mez pevnosti	[MPa]
RmT	Mez pevnosti při tečení	[MPa]
SAW (121)	(Submerged Arc Welding), svařování automatem pod tavidlem	
SK	Svarový kov	
SMAW (111)	(Manual Metal Arc Welding), svařování ručně obalenou elektrodou	
TOO	Tepelně ovlivněná oblast	
TZ	Tepelné zpracování	
ZK	Základní materiál	
\mathcal{E}	Deformace	[%]

1. Úvod

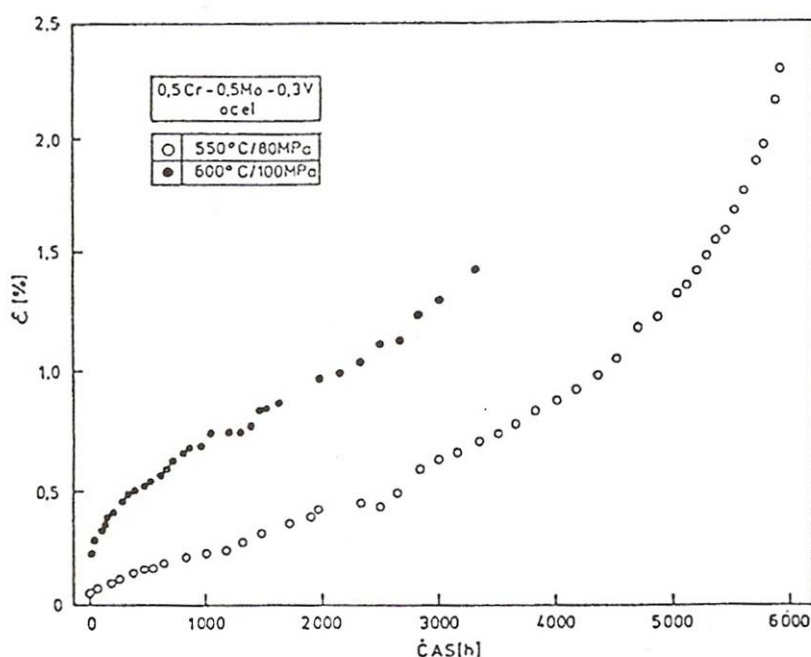
Žáropevné oceli představují skupinu kovových materiálů, které se používají pro práci za zvýšených teplot v tzv. oblasti creepového namáhání. Jedná se o řadu komponentů a strojních součástí hlavně tepelné energetiky, jako přehříváková a parovodní potrubí, kotlové bubny včetně skříní a rotorů parních i spalovacích turbín a v neposlední řadě i membránových stěn kotlů v některých případech pracujících v nadkritických podmínkách (tlak páry přes 260 bar a teplota přes 600°C) [1]. Právě kvůli efektivnosti tepelných zařízení jsou na materiály kladeny stále vyšší požadavky na žárovevnost, což vede k vývoji nových žárovevných ocelí.

Tato diplomová práce se zabývá problematikou svařitelnosti nové žárovevné oceli (T24) určené pro konstrukci membránových stěn kotlů pracujících v nadkritických podmínkách páry. V této práci jsou posuzovány mechanické vlastnosti svarových spojů nízkolegované žárovevné oceli 7CrMoVTiB10-10 jak po tepelném tak i bez tepelného zpracování. Závěrem jsou shrnuty nejvýhodnější parametry svařování, přídavné materiály a tepelné zpracování vedoucí k vyhovujícím mechanickým vlastnostem svarových spojů.

2. Všeobecná charakteristika žárovevných ocelí

Vývoj žárovevných ocelí je založen na znalosti mechanismů creepové deformace a jejich působení podle daných teplotních a napěťových podmínek při dlouhodobé vysokoteplotní expozici. Za podmínek konstantního napětí a konstantní teploty dochází u exponované oceli k trvalému přírůstku deformace s časem expozice [1].

Z diagramu „deformace – čas“ viz Obrázek č. 1, jsou na tzv. křivce tečení vidět 3 stádia časového průběhu creepu.



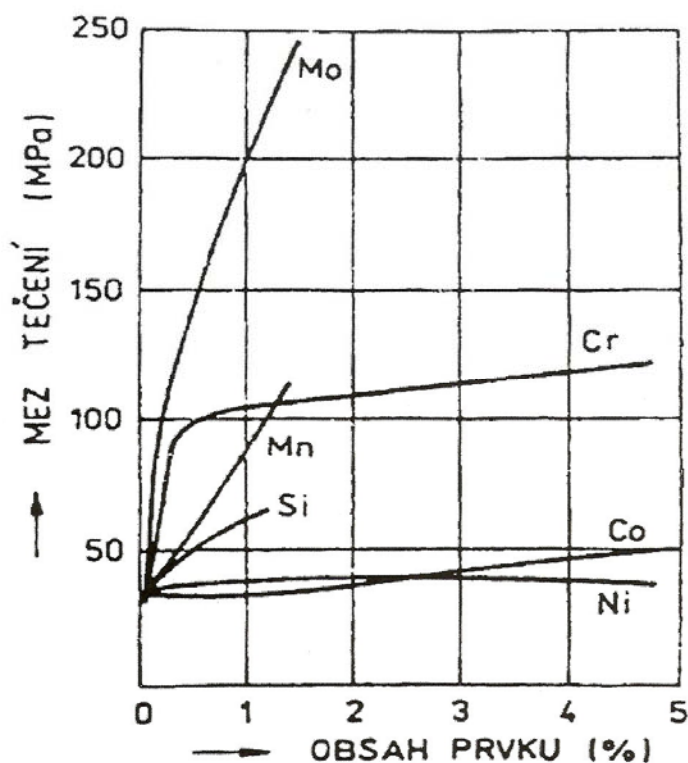
Obrázek č. 1 graf „deformace – čas“ [1]

V počátečním primárním stádiu, které není z technického hlediska významné, dochází k prvotnímu nárůstu deformace po aplikaci zatížení v krátké expozici. Následuje ustálené stádium tečení, dochází k lineárnímu přírůstku deformace s časem po relativně dlouhou dobu expozice. Creep pokračuje terciálním stádiem tečení provázející intenzivní poškození vnitřní struktury kovu vedoucí k prudkému nárůstu deformace a následnému lomu. Z technického hlediska se používá jen druhé stádium creepu, pro které je počítána doba služby projektovaného zařízení. Z křivek tečení a zkouškami tečení do lomu se získávají nezbytné údaje pro konstrukci a spolehlivý provoz zařízení pracujících za vysokých teplot. Jedná se o údaje meze pevnosti při tečení za doby 10^4 ; 10^5 až 2×10^5 provozních hodin a meze tečení pro dosažení určitého stupně deformace (1%, 2% atd.). Ve všech případech tyto mechanismy úzce souvisí s pohybem dislokací mřížkou tuhého roztoku.

Na žáropevnost ocelí proto budou mít hlavní podíl faktory, které zpevňují mřížku tuhého roztoku a tím komplikují dislokační skluz nebo difuzní pohyb [1].

3. Mechanizmy zpevnění a degradační procesy žáropevných ocelí

Znalosti, jak změny mikrostruktury ovlivňují pevnost materiálu a kterým technologickým krokům je nutné se vyhnout, aby nedocházelo k podkročení pevnostních charakteristik daného materiálu, jsou založeny na principech mechanismů zpevnění a degradačních procesů [12]. Pro zvýšení pevnosti, meze kluzu a R_{mT} existuje mnoho mechanismů, počínaje druhem krystalické mřížky, deformačním zpevněním, substitučním zpevněním tuhého roztoku a disperzním zpevněním. Pro zpevnění nízkolegovaných žáropevných ocelí z hlediska možného pozdějšího svařování je nejdůležitější typ krystalické mřížky (druh použité oceli), substituční a intersticiální zpevnění tuhého roztoku a zpevnění jemnou disperzí precipitátů. Vliv např. molybdenu, chromu a dalších prvků na mez tečení ukazuje obr. 2 [2].



Obrázek č.2 Vliv Mo, Cr, Mn, Si, Co a Ni na mez tečení nízkolegovaných ocelí [2]

3.1 Typ krystalické mřížky

Oceli s austenitickou strukturou (CrNi austenitické oceli), mají vyšší odolnost proti creepu, než se strukturou feritickou. Příčinou je schopnost gama mřížky vytvářet tzv. parciální dislokace, které omezují dislokační skluz mřížkou [1].

3.2 Substituční a intersticiální zpevnění

Jedná se o substituční zpevnění tuhého roztoku pomocí atomu legujícího prvku s velkým atomovým poloměrem. Prvek s větším atomovým poloměrem, který zabral místo v krystalické mřížce oceli zdeformuje mřížku jako celek a následně znesnadňuje dislokační skluz mřížkou. U nízkolegovaných žárovevných ocelí se velmi často využívá molybden. Velikost zpevnění je úměrná jeho množství v tuhém roztoku. Jeho účinek je snížen při tvorbě speciálních karbidů Mo a tím snížením jeho obsahu v tuhém roztoku [1].

Intersticiální roztoky způsobují, že atomy s malými atomovými poloměry jako např. C, N, B se rozpustí v mřížce kovu. Dojde k tzv. expanzi mřížky a zvětší se mřížkový parametr. Intersticiální atomy v mřížce mají vliv na pohyb dislokací a vznik plastické deformace. Napětí v oblasti cizích atomů vyvolané deformací mřížky mění modul pružnosti materiálu a v důsledku interakce s napětím v okolí dislokace se dislokační skluz (creep) stává obtížnější [12].

3.3 Disperzní částice

Přítomnost částic jemného precipitátu ve struktuře. (karbidy, nitridy, resp. karbonitridy vybraných legujících prvků jako Cr, Mo, V, Nb). U nízkolegovaných CrMo a CrMoV ocelí, podobně jako u feritických Cr ocelí se jedná o tzv. tvrdé karbidy typu Cr_7C_3 , Cr_{23}C_6 , Mo_2C , V_4C_3 , resp. VCN, NbC, které účinně zabraňují dislokačnímu pohybu pomocí tzv. Orowanova mechanismu [1]. Aby byl jejich účinek co nejvyšší, musí být splněny určité podmínky. Karbidy musí být jemné a jejich vzdálenosti mezi sebou malé. Účinek těchto částic ve struktuře se hodnotí pomocí střední vzájemné vzdálenosti částic „l“ viz vzorec č. 1 [1]. Vliv karbidů se mění s délkou výdrže na teplotě [2].

Rovnice č.1 [1]

$$l = \frac{1}{2} (n_v \cdot d)^{-\frac{1}{2}} - d \sqrt{\frac{2}{3}}$$

n_v = střední počet částic v objemu

d = střední průměr částic precipitátu

Zmenšení vzájemné vzdálenosti částic „ l “ vede, jak ke zvýšení meze kluzu za normální teploty, tak i k výraznému zvýšení meze pevnosti při tečení a zároveň se snižuje rychlost creepové deformace [3].

3.4 Degradací procesy

Degradací procesy se projevují snížením výše uvedených mechanismů zpevnění v důsledku vysokoteplotní expozice [13].

Snížení precipitačního zpevnění

Ke snížení precipitačního zpevnění dochází v důsledku hrubnutí sekundárních fází, vlivem rozpuštění jemných disperzních částic v průběhu růstu částic karbidů M_6C nebo intermetalické fáze nitridů (Cr, V, Nb). Tyto částice jsou hrubé a rostou vlivem teplotní expozice na úkor částic jemných např. karbid M_6C u nízkolegovaných chromových ocelí. Hrubnutí karbidů, karbonitridů nebo nitridů vede k rozpouštění malých a růstu velkých částic, což vede k celkovému snížení počtu a zvětšování středního průměru částic. Tímto procesem se zvětšuje vzájemná vzdálenost částic a dochází k poklesu precipitačního zpevnění [13].

Snížení substitučního zpevnění

Obsahy prvků s větším atomovým poloměrem jako Mo zlepšují žárovevnost rozpustností v tuhém roztoku. Ovšem obsah těchto prvků v oceli je často mnohem vyšší než v tuhém roztoku v rovnovážném stavu při pracovní teplotě. Tento fakt vede k precipitaci částic M_6C obsahujících molybden, který výrazně snižuje obsah tohoto prvku v tuhém roztoku a žárovevnost klesá [14].

4. Vliv mikrostruktury nízkoleg. ocelí na žárovevnost

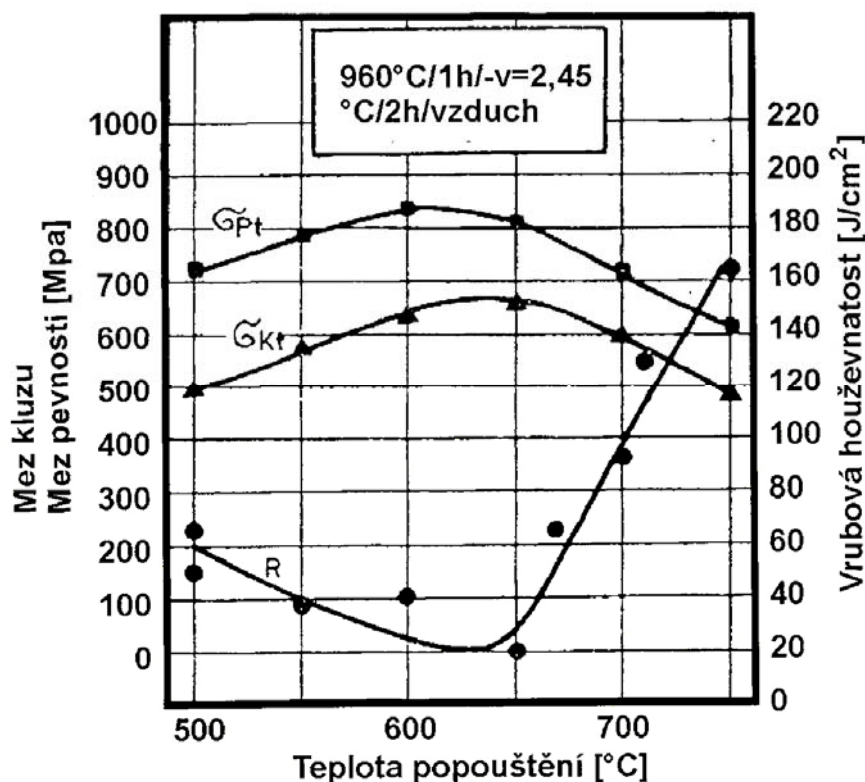
Struktura nízkolegovaných CrMo a CrMoV ocelí je podle ARA diagramů závislá na rychlosti ochlazování z austenitizační teploty. U reálných výrobků různých tloušťek je pozorována široká škála struktur od feriticko - perlitické až po bainiticko – martenzitickou [13]. Optimální, z hlediska žárovevnosti je u nízkolegovaných ocelí struktura feriticko – bainitická [3].

Jako nevhodnou strukturu lze považovat strukturu martenzitickou či perlitickou z důvodu vytvrzování hrubých karbidických částic. Struktury feritických Cr ocelí jsou převážně bainitické. Toto je dáno výchozí konstitucí chromové matrice s tzv. samokalitelným efektem. Kromě dosažení vhodného typu struktury je důležité vhodné dosažení karbidické disperze při popouštění. Tento proces se nazývá vytvrzování, kdy dochází k precipitaci částic karbidů a karbonitridů V_4C_3 , $M_{23}C_6$ aj. jejichž optimální vzájemná vzdálenost zaručuje vysokou žárovevnost a jejich velikost se pohybuje ve škále 5 až 100nm [3].

Na mikrostrukturu a disperzní částice má výrazný vliv teplota popouštění, proto je zde důležité přísné dodržení vhodných popouštěcích teplot. Proces sekundárního vytvrzování vede k nárůstu krátkodobé meze kluzu a meze pevnosti za současného poklesu odolnosti proti křehkému lomu s maximálním vytvrzením okolo teplot 550°C – 650°C podle typu oceli.

Při poměrně nízkých teplotách bodu přeměny Ac_1 např. u oceli 15 128 (13MoCrV6)

720°C – 760°C , může být pro optimální popouštění jen velmi úzká oblast popouštěcích teplot např. 700°C – 720°C , pro překonání kritického minima vytvrzení a nepřekročení teploty počátku přeměny Ac_1 . (obr. č. 3). Tento fakt je velmi důležitý, protože např. při montážním zpracování svarových spojů, nebo kdykoli při překročení této teploty počátek austenitizace vede ke zhrubnutí karbidického precipitátu a poklesu žárovevnosti [3].



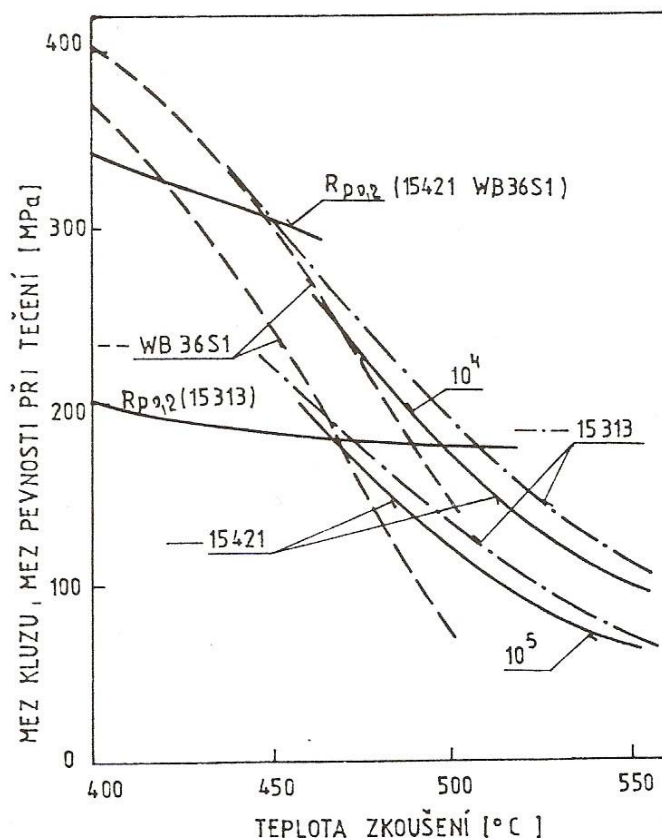
Obrázek č. 3 Vliv teploty popouštění na mechanické vlastnosti nízkolegované žárovevné oceli 15 128 [10]

5. Rozdělení žárovevných ocelí

Vhodný typ žárovevné oceli vychází z její teplotní odolnosti (maximální použitelná teplota, pevnostní charakteristiky při zvýšených teplotách, žáruvzdornost). Nelze zanedbat ani jejich dostupnost, množství a druh požadovaného výrobku (plechy, trubky, výkovky atd.) pro danou teplotní oblast, podobně jako možnost jejího technologického zpracování. Všeobecně platí že, čím je žárovevná ocel více legovaná, tím je vyšší cena a většinou i náročnější technologie zpracování. Na druhou stranu vyšší užitné vlastnosti u výše legovaných skupin žárovevných ocelí vedou k výraznému odlehčení konstrukcí. Optimální volba potom závisí na komplexním posouzení výše uvedených předností i záporů [1].

Vzhledem k tomu, že žárovevné oceli mohou sloužit rovněž za teplot nižších než je oblast použití v creepové oblasti, je pro správnou volbu pevnostního kritéria nezbytná definice teploty průsečíku hlavních výpočtových hodnot, tj. meze kluzu za vyšších teplot a meze pevnosti při tečení. Schematicky je tento přírůstek znázorněn na obrázku č. 4 [1].

Pro spolehlivý výpočet je nutno vždy volit jako výpočtovou veličinu pevnostního výpočtu nižší hodnotu, při teplotách pod uvedeným průsečíkem budou využívány hodnoty meze kluzu (mez pevnosti při tečení je podstatně vyšší), naopak při vyšších teplotách pak hodnoty pevnosti při tečení, které se i u žárovevných ocelí, prudce snižují s teplotou expozice [1].



Obrázek č. 4. Teplotní závislosti výpočtových veličin – meze kluzu a meze pevnosti při tečení pro vybrané typy nízkoalokovaných žárovevných ocelí [1]

Z teplotního pohledu používání a úrovně legování lze žárovevné oceli rámcově rozdělit na skupiny uvedené v tabulce č. 1 [1].

Tabulka č. 1 Použitelnost jednotlivých typů oceli pro určité teplotní oblasti [1]

Typ oceli		Použitelná teplota do °C
Uhlíkové kotlové oceli	(do 0,2 hm % C)	450 (480)
Nízkoalokované oceli		560 (580)
Feritické chromové oceli	legury:(Mo, V, Nb, N)	600 (620)
Austenitické CrNi oceli:	typu 18/8	650
	vytvrditelné (Nb, Zr, N)	750

Pro oceli uvedené v tabulce č. 1. je použití nad teploty 750°C nemožné z důvodu velmi nízké žárovevnosti i žáruvzdornosti. Existují ještě slitiny na bázi Ni (Nimonic) do oblasti použití cca 900°C, pro ještě vyšší teploty potom slitiny těžkých kovů jako W, Mo, Nb (nad 1200°C), podobně jako kovokeramické materiály (cermety) na bázi oxidů TiO₂; ZrO₂; Al₂O₃, případně karbidu SiC [1].

Jednotlivé skupiny žárovevných ocelí

Uhlíkové kotlové oceli

Jedná se o jemnozrnné oceli s nízkým obsahem uhlíku dezoxidované Al nebo Ti. Používají se pro nízkoteplotní okruhy parních kotlů do teplot 450°C. Známé oceli tohoto typu jsou například 11 483 (S355J2G3), podobně jako 12 021 (L245NB) nebo 12 022 (L290NB) používané pro kotlové trubky. Zvláštní ocel tohoto typu je nová 12 025 vyráběna ve variantách mikrolegur 0,02 hm.% až 0,05 hm.% Nb nebo 0,05 hm.% až 0,07 hm.% V. Její použití se přibližuje k teplotám 500°C a způsobem zpevnění struktury karbonitridickými částicemi se blíží typům nízkolegovaných ocelí [1].

Nízkolegované oceli

Jedná se o nejlépe propracovanou skupinu žárovevných ocelí používaných na bázi CrMo nebo CrMoV, které z hlediska hmotnosti představují největší podíl tepelně namáhaných komponentů u bloků tepelné energetiky. Nejrozšířenější ocelí je ocel s označením dle ČSN 15 313 (T22) na bázi 2,25Cr a 1Mo, z ocelí legovaných vanadem potom špičková ocel 15 128 (13MoCrV6) na bázi 0,5Cr-0,5Mo-0,3V. Vedle těchto ocelí používaných na trubkové varné systémy, přehříváky a parovody jsou známé oceli dle ČSN 15 236 (24CrMoV55) na lopatky turbín, 15320 (24CrMoV5) na rotory a skříně turbín. Vysoká žárovevnost nízkolegovaných ocelí tř. 15, která je odstupňována podle legování hlavními prvky Mo a V, je dána zejména vysokým podílem precipitačního zpevnění struktury částečně i substitučním zpevněním atomy Mo v tuhém roztoku. Na dlouhodobou vysokoteplotní odolnost těchto ocelí má vliv jejich strukturní stabilita, zejména termodynamická i rozměrová stálost přítomných karbidických částic. Jedná se např. o tyto oceli (15020 (16Mo3), 15121 (13CrMo4-5), T23, T24, F2W)[1].

Feritické chromové oceli

Žáropevné feritické oceli se zvýšeným obsahem Cr začínají od obsahu 5 hm%. Cr např. 17 102 (5CrMo16). Kvalitativně vyšší žárovevnost představují obsahy 9 a 12 hm%. Cr, legované dále malými obsahy Mo do (1 hm.%) a V do (0,5 hm.%). Patří mezi ně zároveň vodíkovzdorné oceli 9Cr–1Mo a 9Cr–1Mo–0,5V (17 116 (X12CrMo9-1), resp. 17 117); typická feritická žárovevná ocel je široce používaná ocel 17 134 (X20CrMoV121) na bázi 12Cr–1Mo–0,5V. Perfektní ocel na bázi 9 Cr–Mo–V–Nb–N (17 119) - P91, konkuruje svou žárovevností nesrovnatelně dražším austenitickým CrNi ocelím, a je u ní využito pro zajištění žárovevnosti jak zpevnění tuhého roztoku zejména atomy Mo, tak i vyloučení precipitátu na bázi karbonitridů vanadu a niobu. Na stejném principu jsou vytvořeny i nové oceli s ještě zvýšenou žárovevností P92 a VM12 [1].

Austenitické žárovevné oceli

Ze slitin na bázi železa představují skupinu s nejvyšší odolností proti tečení za vysokých teplot. Vysoká žárovevnost je zde dána snadnou tvorbou tzv. vrstvených chyb, které znemožňují skluzový pohyb dislokací a k jejich konstrukci a dalšímu pohybu je nezbytné výrazné zvýšení napětí. Na druhé straně se jedná o oceli mnohem dražší než například nízkolegované typy díky vysokým obsahům Cr a Ni, s obtížnou technologickou zpracovatelností. Základem austenitických žárovevných ocelí je typická CrNi ocel 18/8 bez dodatečného legování stabilizačními prvky, např. 17 246 (X10CrNiTi18-10) s chemickým složením 1Cr-18Ni-8Ti a teplotou použití do 620°C; následující komplexně vytvrditelné legované oceli legované Mo, Nb a N např. 17 341 (X6CrNiMo1713) s chemickým složením 1Cr-17Ni-13Mo, se zvýšenými obsahy až 21 hm.% Cr a 13 hm.% Ni. Tyto oceli se používají do teplot 650°C – 700°C [1].

Další špičkové typy s variantami dalšího legování V, W, B, Nb, Al, Ce atd. až 750°C. Jejich vysoká žárovevnost je dána zvláštními vytvrzovacími režimy, kdy po rozpouštěcím žíhání a ochlazení ve vodě následuje vytvrzování při teplotách 700°C – 780°C za vzniku speciálních karbidů a karbonitridů V, W a Nb a intermetalických fází, např. Ni₃ (Al, Ti). Od ocelí typu CrMn na bázi 10Cr8Mn18V (17 483) i přes vysokou žárovevnost se upustilo kvůli zvýšené přecitlivělosti na mezikrystalickou korozi způsobené vlivem kondenzace vody při odstávkách zařízení [1].

6. Charakteristika nízkolegované oceli 7CrMoVTiB10-10

Hlavní oblastí, pro kterou je ocel T24 (7CrMoVTiB10-10) navržena, je konstrukce membránových stěn kotlů s nadkritickými parametry páry a to tlak přes 260 bar a teplota do 600°C.

Ocel T24 byla na začátku devadesátých let vyvinuta v Německu, jako reakce na japonskou ocel T23. Základní legující báze oceli T24 vychází z osvědčeného vzorce oceli T22 (10CrMo9-10) – 2,25Cr a 1Mo (dle ČSN 15 313). Navíc však zde přibývají legující prvky V a Ti, které tvoří stabilní karbidy či karbonitridy o velice jemné disperzi. Kromě toho zde navíc mají vliv intersticiální prvky bór a dusík, které mají rovněž prokázaný příznivý vliv na zvýšení žáropevnosti oceli. Orientační chemické složení oceli, T22, T23 a T24 je v tabulce č. 2 [2], porovnání mezí pevnosti při tečení pak v tabulce č. 3 [4].

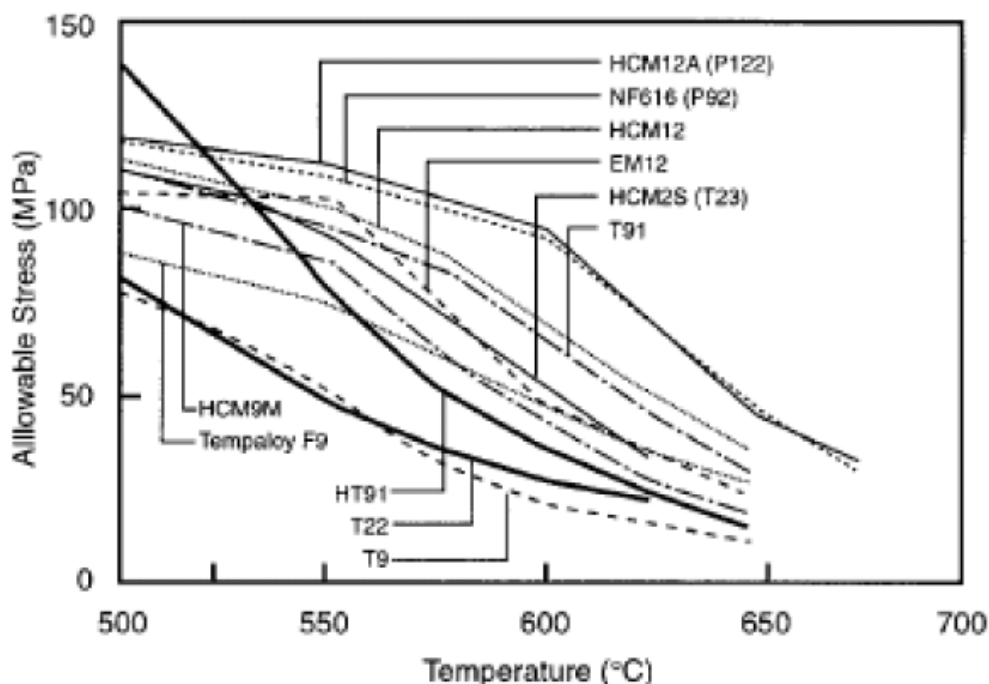
Tabulka č. 2 Chemické složení jednotlivých ocelí [2]

ocel	C	Mn	Si	Cr	Mo	V	Ti	N	B	W
T22	Max. 0,15	0,3 - 0,6	0,25- 1	1,9- 2,6	0,89- 1,13	-	-	-	-	-
T23	0,04- 0,10	0,1- 0,6	max. 0,50	1,9- 2,6	0,05- 0,3	0,20- 0,30	-	Max. 0,030	0,0005- 0,0060	1,45- 1,75
T24	0,05- 0,10	0,30- 0,70	0,15- 0,45	2,2- 2,6	0,9- 1,1	0,2- 0,3	0,05- 0,1	Max. 0,012	0,0015- 0,0070	-

Vývoj oceli T24 se ubírá dvěma základními směry a to zvýšením žáropevnosti oproti konvenční oceli T22 a zlepšením svařitelnosti, čehož by mělo být dosaženo snížením obsahu uhlíku pod hranici nezbytně nutnou pro zachování její žáropevnosti tj. pod hranici 0,10 hm.% a velmi úsporným legováním. Takovéto úsporné legování a minimální množství uhlíku nám zaručí sníženou hodnotu uhlíkového ekvivalentu a tím i snížení potřebné teploty přehřevu [5].

Tabulka č. 3 Meze pevnosti jednotlivých ocelí při tečení [4]

Ocel	Mez pevnosti při tečení za 10 ⁵ h [MPa]		
	500°C	550°C	600°C
T22	137	69	34
T23	220	149	50
T24	190	130	60



Obrázek č. 5 Meze pevnosti jednotlivých ocelí při tečení [12]

Nově vyvinuté oceli (T23 a T24) dosahují výrazně vyšší žárovevnosti než původní ocel T22 na bázi 2.25 hm.% Cr a 1 hm.% Mo. Při srovnatelných teplotách a tlaku páry umožňuje zlepšení žárovevnosti používat trubky s menší tloušťkou stěny [4].

7. Posouzení svařitelnosti

Nízkolegované oceli mají vyšší mez kluzu a pevnost za normálních teplot v porovnání s oceli nelegovanými. Toto zvýšení je dáno zpevněným tuhým roztokem, jemnozrnnou strukturou, zvýšeným podílem speciálních karbidů a precipitačním vytvrzováním. Nízkolegované žárovevné oceli jsou dobře svařitelné a zpracovatelné. Lze z nich bez problémů vytvářet požadované hutní polotovary. Oceli se používají v normalizovaném a popuštěném stavu. Nejvýhodnější je vyloučení popuštěného bainitu ve struktuře vlivem vyšších ochlazovacích rychlostí po austenitizaci z důvodu dosažení co nevyšší žárovevnosti [6].

Nízkolegované žárovevné oceli se svařují s předehřevem. Velikost teploty předehřevu je úměrná obsahu prvků zvyšující prokalitelnost (Cr, Mo, V). Spolu s uhlíkem a manganem jsou příčinou vysokých tvrdostí v TOO svarového spoje [6]. Tyto oceli jsou dle ČSN hodnoceny jako oceli vhodné ke svařování [15].

Vysoké rychlosti ochlazování v okolí svaru způsobují vznik křehkých vrstev, podobně jako precipitace křehkých disperzních částic v určitých oblastech svaru. Proto je svařitelnost CrMo a CrMoV ocelí závislá na přísném dodržování svařovacích postupů, zejména teplot předehřevu, kontrolovaných tepelných příkonů, teplot interpass, dohřevů a tepelného zpracování. Nedodržování teplot předehřevu u větších tloušťek, vede k tvorbě trhlin a volba nevhodných teplot tepelného zpracování způsobuje precipitaci disperze karbonitridických částic o kritické velikosti s následným poklesem hodnot vrubové houževnatosti [6].

Ocel T24 má vylepšenou svařitelnost díky nižšímu obsahu uhlíku pod (0,1 hm.%) a úsporným legováním Cr, Mo, V a Ti jen pro zajištění nezbytné žárovevnosti, což vede k celkovému snížení hodnot uhlíkového ekvivalentu = lepší svařitelnosti a nižším teplotám předehřevu. Ocel T24 se svařuje všemi běžnými technologiemi svařování jako (141) GTAW, (111) SMAW a (121) SAW [7].

Pro svařování oceli T24 se používají přídatné materiály 2,5Cr-0,1Mo-0,25V-1,5W-Nb nebo 2,5Cr-1Mo-0,25V-Nb [7].

Tvrдость v TOO u oceli T24 dosahuje hodnot až 450HV10 v nepopuštěném stavu [8]. Tyto hodnoty jsou vyšší, než požaduje norma ČSN EN ISO 15 614 -1 ke schválení postupu svařování. Při provozu na teplotě 519°C po dobu 14 000 hodin poklesly tvrdosti v TOO na 300HV10 [8].

Svarové spoje ocelí CrMo a CrMoV se s ohledem na nízký obsah uhlíku ve svarovém kovu pouze popouští. Teplota popouštění se volí dostatečně vysoká, aby nedocházelo k sekundárnímu vytvrzování svarového kovu, nebo TOO při pracovních teplotách provozování zařízení. Nedodržení teploty popouštění 680 – 720°C vede k nepřipustnému zvýšení tvrdosti svarového spoje (sekundární vytvrzení) a možnosti vzniku křehkých lomů. Před žíháním na snížení pnutí by teplota svarových spojů tlustších než 40 mm neměla klesnout pod 100°C [6].

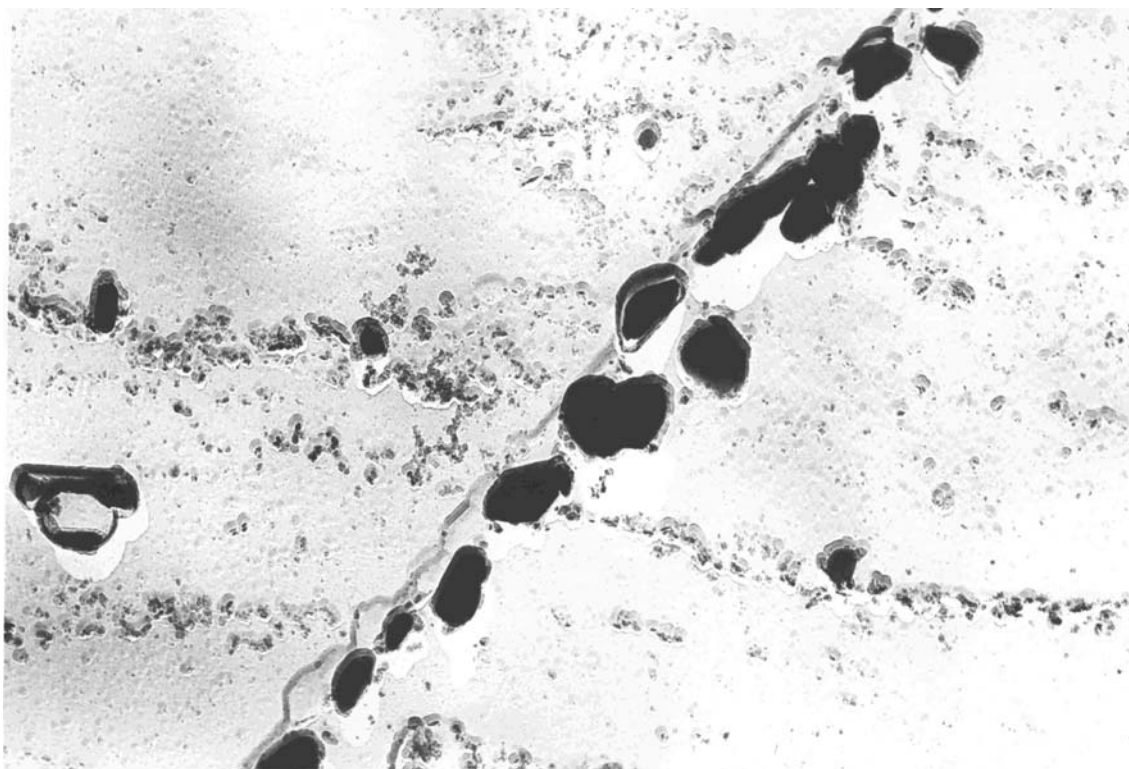
8. Rozbor disperzních částic

Příčinou zvýšení žárovevnosti je u ocelí legovaných, vanadem, titanem a niobem jemný precipitát disperzních částic s vysokou rozměrovou stabilitou v průběhu dlouhodobého působení teplotní expozice. Tato disperze jemných částic má přímý vliv na plastické vlastnosti dané oceli. Tato plasticita úzce souvisí se změnami parametrů disperze vytvrzujících částic. Po standardním tepelném zpracování tzn. normalizace a popouštění vzniká ne zcela rovnovážný stav struktury a během následné teplotní expozice dochází k dodatečné precipitaci částic MX v důsledku přesyceného tuhého roztoku. Tento fakt se nejvýrazněji projeví v oblasti svarových spojů, kdy dochází vlivem působení svařovacího procesu k různým stupňům rozpuštění dispergovaných částic. Pokud tedy dojde k nesprávnému zvolení popouštěcí teploty, částice MX dostatečně nevyprecipitují během popouštění, vznikne nerovnovážný stav a bude docházet k dodatečnému sekundárnímu vytvrzení během provozování zařízení, které způsobí pokles plastických vlastností a zvýšení hodnot tvrdosti nad přípustné meze [9].

Ze zkušebních vzorků oceli T24 byly připraveny extrakční uhlíkové repliky, vhodné pro pozorování sekundárních částic na transmisním elektronovém mikroskopu. Na uhlíkových replikách byly identifikovány tři druhy disperzních částic [9].

- 1) primární karbonitridy titanu TiCN
- 2) hrubé sekundární karbidy chromu M_7C_3
- 3) jemné sekundární částice MX.

(U oceli T24 může značka MX představovat VC, VCN nebo TiCN). Snímek uhlíkové repliky z pásma přehrábí je na obrázku č. 5 [9].



**Obrázek č. 6 Disperzní částice v pásmu přehřátí TOO, ocel T24 po popouštění
750 °C / 2h Zv. 60000x [9]**

Extrakční uhlíková replika: zvětšení 60 000x, jemné částice - MX, hrubé částice v řádku - M_7C_3 , hrubé oválné částice – TiCN

Částice MX se vyznačují nejnižší střední vzájemnou vzdáleností, nejmenší velikostí a nejvyšším počtem částic na jednotku plochy i objemu ze všech pozorovaných částic. Proto mají na stupni žárovevnosti největší podíl [9].

Během popouštění dochází rovněž k precipitaci karbidů chromu M_7C_3 . Tyto karbidy jsou o jeden řád větší než částice MX. Jejich střední vzájemná vzdálenost je podstatně větší a jejich počet je dokonce o dva řády nižší. Vliv karbidů M_7C_3 na žárovevnost a mechanické vlastnosti svarových spojů oceli T24 je proto ve srovnání s částicemi MX malý [9].

Částice TiCN se rovněž vyskytují ve struktuře těchto ocelí. Jako jediné se většinou vyskytují jak u tepelně zpracovaných, tak i nezpracovaných svarových spojů. Ovšem při popouštění dochází k další precipitaci těchto částic, vzdálenosti se mezi nimi snižují, jejich počet vzrůstá. Z hlediska žárovevnosti je opět lepší stav po tepelném zpracování, kdy částice TiCN zaručují lepší žárovevnost [9].

9. Postup svařování trubek

Pro zhotovení zkušebních spojů trubek bylo navrženo použití stejné technologie svařování, jaká se v praxi běžně používá pro svařování materiálů této jakosti v energetických zařízeních, technologii 141 - GTAW. Jako experimentální materiál byly vybrány 4 kusy trubek jakosti 7CrMoVTiB10-10, průměr 38 mm a tloušťka stěny 6,3 mm. Přídavný materiál byl použitý Union I 24 od firmy Böhler o průměru 2,4 mm. Tato firma jej přímo vyvinula pro svařování oceli této jakosti a měl by zaručit vyhovující strukturu i požadované mechanické a žárovečné vlastnosti svarových spojů. Trubky byly svařovány tupým spojem v poloze PA, úkosity provedeny strojním třískovým obráběním, předehřev, dohřev a tepelný režim svařování jsou uvedeny ve „Specifikaci postupu svařování WPS“.

Tabulka č. 4 Chemické složení základního materiálu T24 (hm.%)

ocel	C	Mn	Si	Cr	Mo	V	Ti	N	B	W
T24	0,05- 0,10	0,30- 0,70	0,15- 0,45	2,2- 2,6	0,9- 1,1	0,2- 0,3	0,05- 0,1	Max. 0,012	0,0015- 0,0070	-

Tabulka č. 5 Chemické složení přídavného materiálu UNION I 24 (hm.%)

ocel	C	Mn	Si	Cr	Mo	V	Ti/Nb	N	B	W
T24	0,061	0,49	0,23	2,29	1	0,24	0,041	0,014	0,0020	-

Ověření uhlíkových ekvivalentů programem firmy ESAB

ZM – A = T24

ZM – B = UNION I 24

Uhlíkové ekvivalenty CE:

$T24-0,88 \div UNION I-0,85$

Jsou téměř shodné, přídavný materiál vyhovuje.

Tabulka č. 6 výpočty teplot předehřevu dle jednotlivých autorů:

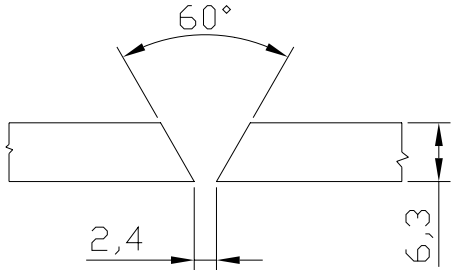
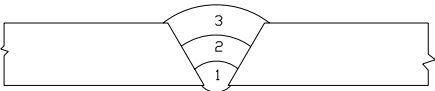
Výpočet předehřevu dle:	Vypočtená teplota
Seferián	190°C
Ito a Bessy	160°C

Specifikace svařovacího postupu WPS

9.1 Záznam svařování trubky č. 1

	SPECIFIKACE POSTUPU SVAŘOVÁNÍ WPS	č. TR_1:
--	---	----------

Výrobce	VŠB - TUO	Označení základního materiálu	6.4 + 6.4
Místo	17. listopadu 15 / 2172 Ostrava-Poruba	Tloušťka materiálu [mm]	6,3 tupý spoj (BW)
Strana / ze stran	1/1	Revize	0
Svařovací proces	141	Max. tloušťka svar. kovu [mm]	7,6
Typ spoje	Tupý (BW)	Vnější průměr [mm]	38
Způsob přípravy úkosu		Poloha svařování	PA
		Kvalifikace procesu dle:	EN ISO 15 614-1
		Strojní opracování, dále čištění od mastnoty, vlhkosti, barvy, okují, rzi a jiných nečistot.	

<p style="text-align: center;">Návrh spoje</p>  <p style="text-align: right;">*1)</p>	<p style="text-align: center;">Pořadí svařování</p> 
---	--

Podrobnosti svařování										
Pořadí *2)	Číslo housenky	Index přidav. materiálu	Ø elektrody drátu [mm]	Proces Svařování	Proud [A]	Napětí [V]	Typ proudu/polarita	Rychlost svařování [mm/min]	Poloha Svařování *3)	Tepelný příkon [kJ/mm]
I	1	S	2,4	141	100 ÷ 105	11 ÷ 12	DC / -	60	PA	0,756
II	2	S	2,4	141	122 ÷ 126	11 ÷ 12	DC / -	53	PA	1,027
III	3	S	2,4	141	122 ÷ 126	11 ÷ 12	DC / -	55	PA	0,99
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Čištění během svařování Kartáčování nebo broušení dokud zjištěné vady nebudou odstraněny.

Přídavný kov označení UNION 24 I

Druh / rozměr wolframové elektrody W Th 20 ... Ø2,4 mm

Přídavný kov obchodní značka EN 12070 W CrMoV 2 1 TiB

Velikost ústí nebo plynové hubice [mm] 8 ÷ 12

Označení typu Ochranného UN 1006 Ar

Úhel sklonu elektrody, hořáku *4)

plynu ☒ / tavidla ☐

Pro ochranu kořene ----

Jeden nebo více průchodů Více průchodů

Stehování, přípravky *5) dle této WPS

Průtoková rychlost plynu [l/min.] Ochranného 10 ÷ 15

Pro ochranu kořene ----

Teplota předehřevu [C°]	Interpass teplota [C°]	Dohřev [C°/hod]	Tepelné zpracování po svařování [C°] *6)
Min. 100°C	200°C	200°C / 2	760°C / 2 hod

Poznámky / Notes:

*1) Tvar, přesné rozměry svarové hrany dle této WPS

*2) I – kořen, II – výplň, III - krycí

*3) PA

*4) α = PA, α = 60° ÷ 90°

*5) Stehy jsou součástí svaru. Provést metodou 141 min. na 1 vrstvu o min. délce 5 mm. Min. počet stehů 2. Mezeru volit 20÷50 mm dle potřeby.

*6) Doba, teplota, metoda, rychlost ohřevu a ochlazování dle předpisu tepelného zpracování.

Bc. Ondřej Bečica
23. 4. 2009

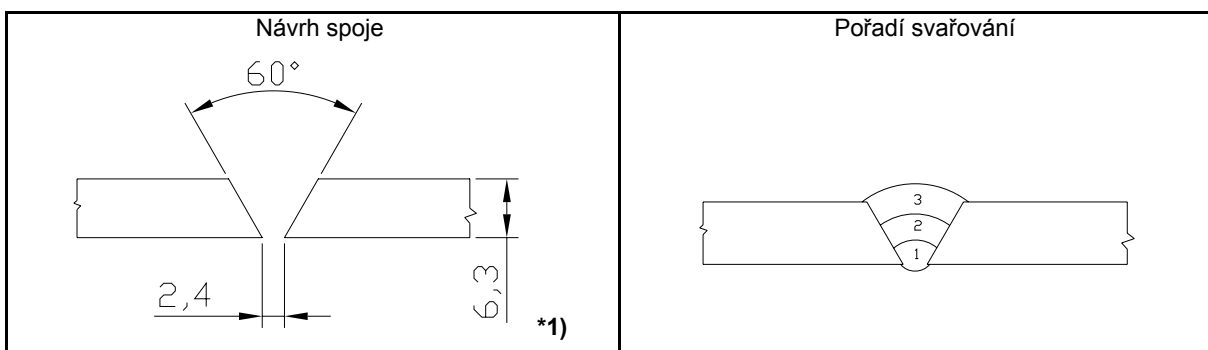
Vypracoval, datum, podpis

Inspektor, datum, podpis

9.2 Záznam svařování trubky č. 2

	SPECIFIKACE POSTUPU SVAŘOVÁNÍ WPS	č. TR_2:
---	---	----------

Výrobce	VŠB - TUO	Označení základního materiálu	6.4 + 6.4
Místo	17. listopadu 15 / 2172 Ostrava-Poruba	TLoušťka materiálu [mm]	6,3 tupý spoj (BW)
Strana / ze stran	1/1	Revize	0
Svařovací proces	141	Max. tloušťka svar. kovu [mm]	7,6
Typ spoje	Tupý (BW)	Vnější průměr [mm]	38
Způsob přípravy úkosu		Poloha svařování	PA
		Kvalifikace procesu dle:	EN ISO 15 614-1
		Strojní opracování, dále čištění od mastnoty, vlhkosti, barvy, okují, rzi a jiných nečistot.	



Podrobnosti svařování										
Pořadí *2)	Číslo housenky	Index přidav. materiálu	Ø elektrody drátu [mm]	Proces Svařování	Proud [A]	Napětí [V]	Typ proudu/ polarita	Rychlost svařování [mm/min]	Poloha Svařování *3)	Tepelný příkon [kJ/mm]
I	1	S	2,4	141	100 ÷ 105	11 ÷ 12	DC / -	38	PA	1,18
II	2	S	2,4	141	118 ÷ 124	11 ÷ 12	DC / -	61	PA	0,88
III	3	S	2,4	141	118 ÷ 125	12 ÷ 13	DC / -	49	PA	1,19
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Čištění během svařování Kartáčování nebo broušení dokud zjištěné vady nebudou odstraněny.

Přidavný kov označení	UNION 24 I	Druh / rozměr wolframové elektrody	W Th 20 ... Ø2,4 mm
Přidavný kov obchodní značka	EN 12070 W CrMoV 2 1 TiB	Velikost ústí nebo plynové hubice [mm]	8 ÷ 12
Označení typu plynu <input checked="" type="checkbox"/> / tavidla <input type="checkbox"/>	Ochranného UN 1006 Ar	Úhel sklonu elektrody, hořáku	*4)
	Pro ochranu kořene	Jeden nebo více průchodů	Více průchodů dle této WPS
		Stehování, přípravky *5)	
		Průtoková rychlost plynu [l/min.]	Ochranného 10 ÷ 15 Pro ochranu kořene ---

Teplota předehřevu [C°]	Interpass teplota [C°]	Dohřev [C°/hod]	Tepelné zpracování po svařování [C°] *6)
Min. 100°C	200°C	200°C / 2	760°C / 2 hod

Poznámky / Notes:

*1) Tvar, přesné rozměry svarové hrany dle této WPS

*2) I – kořen, II – výplň, III – krycí

*3) PA

*4) α = PA, α = 60° ÷ 90°

*5) Stehy jsou součástí svaru. Provést metodou 141 min. na 1 vrstvu o min. délce 5 mm. Min. počet stehů 2. Mezeru volit 20÷50 mm dle potřeby.

*6) Doba, teplota, metoda, rychlost ohřevu a ochlazování dle předpisu tepelného zpracování.

Bc. Ondřej Bečica

23. 4. 2009

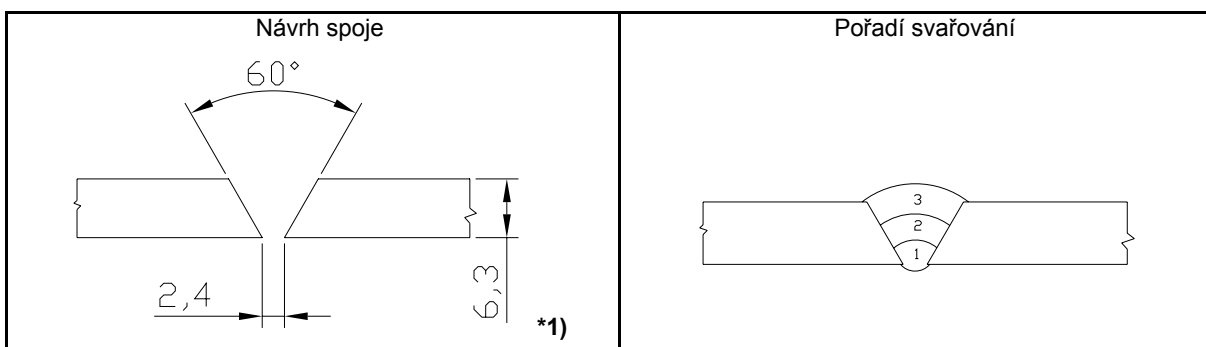
Vypracoval, datum, podpis

Inspektor, datum, podpis

9.3 Záznam svařování trubky č. 3

	SPECIFIKACE POSTUPU SVAŘOVÁNÍ WPS	č. TR_3
---	--	---------

Výrobce	VŠB - TUO	Označení základního materiálu	6.4 + 6.4
Místo	17. listopadu 15 / 2172 Ostrava-Poruba	TLoušťka materiálu [mm]	6,3 tupý spoj (BW)
Strana / ze stran	1/1	Revize	0
Svařovací proces	141	Max. tloušťka svar. kovu [mm]	7,6
Typ spoje	Tupý (BW)	Vnější průměr [mm]	38
Způsob přípravy úkosu		Poloha svařování	PA
		Kvalifikace procesu dle:	EN ISO 15 614-1
		Strojní opracování, dále čištění od mastnoty, vlhkosti, barvy, okují, rzi a jiných nečistot.	



Podrobnosti svařování										
Pořadí *2)	Číslo housenky	Index přidav. materiálu	Ø elektrody drátu [mm]	Proces Svařování	Proud [A]	Napětí [V]	Typ proudu/ polarita	Rychlost svařování [mm/min]	Poloha Svařování *3)	Tepelný příkon [kJ/mm]
I	1	S	2,4	141	100 ÷ 105	11 ÷ 12	DC / -	40	PA	1,145
II	2	S	2,4	141	119 ÷ 123	12 ÷ 13	DC / -	51	PA	1,128
III	3	S	2,4	141	119 ÷ 123	12 ÷ 13	DC / -	53	PA	1,086
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Čištění během svařování Kartáčování nebo broušení dokud zjištěné vady nebudou odstraněny.

Přidavný kov označení	UNION 24 I	Druh / rozměr wolframové elektrody	W Th 20 ... Ø2,4 mm
Přidavný kov obchodní značka	EN 12070 W CrMoV 2 1 TiB	Velikost ústí nebo plynové hubice [mm]	8 ÷ 12
Označení typu plynu <input checked="" type="checkbox"/> / tavidla <input type="checkbox"/>	Ochranného UN 1006 Ar Pro ochranu kořene ----	Úhel sklonu elektrody, hořáku	*4)
		Jeden nebo více průchodů	Více průchodů dle této WPS
		Stehování, přípravky *5)	
		Průtoková rychlost plynu [l/min.]	Ochranného 10 ÷ 15 Pro ochranu kořene ---

Teplota předehřevu [C°]	Interpass teplota [C°]	Dohřev [C°/hod]	Tepelné zpracování po svařování [C°] *6)
Min. 100°C	200°C	200°C / 2	---

Poznámky / Notes:

*1) Tvar, přesné rozměry svarové hrany dle této WPS

*2) I – kořen, II – výplň, III - krycí

*3) PA

*4) α = PA, α = 60° ÷ 90°

*5) Stehy jsou součástí svaru. Provést metodou 141 min. na 1 vrstvu o min. délce 5 mm. Min. počet stehů 2. Mezeru volit 20÷50 mm dle potřeby.

*6) Doba, teplota, metoda, rychlost ohřevu a ochlazování dle předpisu tepelného zpracování.


Bc. Ondřej Bečica

23. 4. 2009

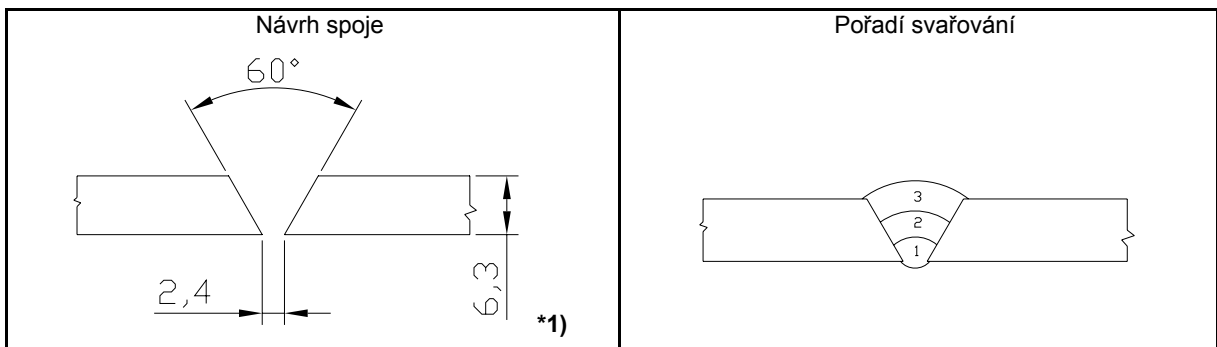
Vypracoval, datum, podpis

Inspektor, datum, podpis

9.4 Záznam svařování trubky č. 4

	SPECIFIKACE POSTUPU SVAŘOVÁNÍ WPS	č. TR_4:
---	---	----------

Výrobce	VŠB - TUO	Označení základního materiálu	6.4 + 6.4
Místo	17. listopadu 15 / 2172 Ostrava-Poruba	TLoušťka materiálu [mm]	6,3 tupý spoj (BW)
Strana / ze stran	1/1	Revize	0
Svařovací proces	141	Max. tloušťka svar. kovu [mm]	7,6
Typ spoje	Tupý (BW)	Vnější průměr [mm]	38
Způsob přípravy úkosu		Poloha svařování	PA
		Kvalifikace procesu dle:	EN ISO 15 614-1
		Strojní opracování, dále čištění od mastnoty, vlhkosti, barvy, okují, rzi a jiných nečistot.	



Podrobnosti svařování										
Pořadí *2)	Číslo housenky	Index přidav. materiálu	Ø elektrody drátu [mm]	Proces Svařování	Proud [A]	Napětí [V]	Typ proudu/ polarita	Rychlost svařování [mm/min]	Poloha Svařování *3)	Tepelný příkon [kJ/mm]
I	1	S	2,4	141	100 ÷ 105	11 ÷ 12	DC / -	44,5	PA	1,021
II	2	S	2,4	141	119 ÷ 123	12 ÷ 13	DC / -	62	PA	0,931
III	3	S	2,4	141	119 ÷ 123	12 ÷ 13	DC / -	61	PA	0,949
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Čištění během svařování Kartáčování nebo broušení dokud zjištěné vady nebudou odstraněny.

Přidavný kov označení	UNION 24 I	Druh / rozměr wolframové elektrody	W Th 20 ... Ø2,4 mm
Přidavný kov obchodní značka	EN 12070 W CrMoV 2 1 TiB	Velikost ústí nebo plynové hubice [mm]	8 ÷ 12
Označení typu plynu <input checked="" type="checkbox"/> / tavidla <input type="checkbox"/>	Ochranného UN 1006 Ar	Úhel sklonu elektrody, hořáku	*4)
	Pro ochranu kořene	Jeden nebo více průchodů	Více průchodů dle této WPS
		Stehování, přípravky *5)	
		Průtoková rychlost plynu [l/min.]	Ochranného 10 ÷ 15 Pro ochranu kořene ---

Teplota předehřevu [C°]	Interpass teplota [C°]	Dohřev [C°/hod]	Tepelné zpracování po svařování [C°] *6)
Min. 100°C	200°C	200°C / 2	---

Poznámky / Notes:

*1) Tvar, přesné rozměry svarové hrany dle této WPS

*2) I – kořen, II – výplň, III - krycí

*3) PA

*4) α = PA, α = 60° ÷ 90°

*5) Stehy jsou součástí svaru. Provést metodou 141 min. na 1 vrstvu o min. délce 5 mm. Min. počet stehů 2. Mezeru volit 20÷50 mm dle potřeby.

*6) Doba, teplota, metoda, rychlost ohřevu a ochlazování dle předpisu tepelného zpracování.

Bc. Ondřej Bečica

23. 4. 2009


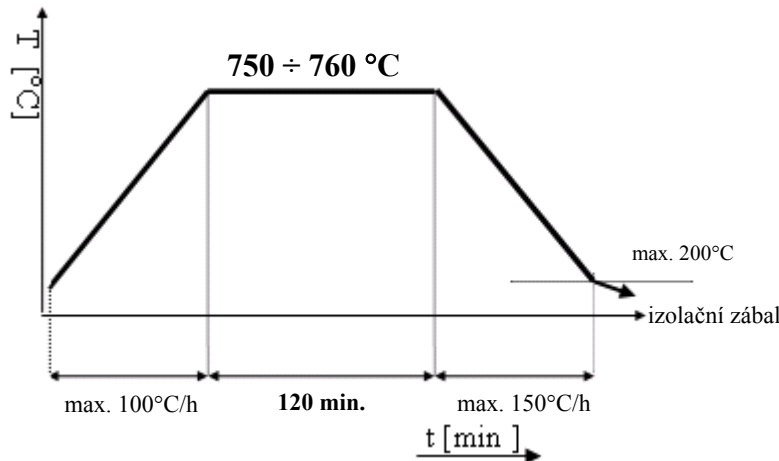
Vypracoval, datum, podpis

Inspektor, datum, podpis

10. Návrh tepelného zpracování

Tepelné zpracování bylo provedeno v elektrické peci. Pro srovnání mechanických vlastností svarových spojů trubek s tepelným zpracováním a bez něj, byly vyžehány jen dvě trubky s označením 1 a 2. Trubky s označením 3 a 4 byly pouze dohřáty a ponechány bez tepelného zpracování.

Diagram tepelného zpracování HT 1.

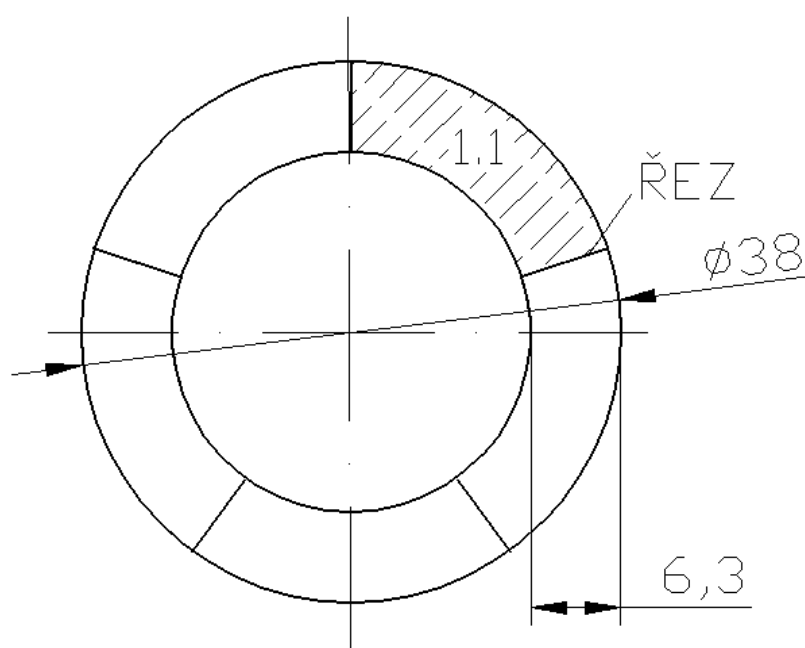
	PLÁN TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ		STRANA 1		
	HT 1		revize: 0		
PEC : elektrická					
DRUH TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ: <input checked="" type="checkbox"/> ŽSP <input type="checkbox"/> NORMALIZACE <input type="checkbox"/> JINÉ					
ČÍS.	PŘEDMĚT	KS	ROZMĚRY	JMENOV. TL.	MATERÁL
1	Trubka + Trubka	2	ø38 x 6,3	6,3	7CrMoVTiB10-10
<p style="text-align: center;">DIAGRAM TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ</p>  <p style="text-align: center;">MAX. DOVOLENÁ TEPLOTA V PECI PŘI VSAZENÍ : 150°C</p> <p style="text-align: center;">ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ TEPLOTY : NE</p> <p>POZNÁMKY: 1) ŽSP – žehání na snížení pnutí</p>					
Technolog svařování			Schválil:		
PODPIS :	Bc. Bečica				
DATUM :	24. 4. 2009		24. 4. 2009		

11. Příprava vzorků pro metalografické rozborý a mechanické zkoušky

Tepelně zpracované i nezpracované trubky byly nařezány podle vzorového obrázku č. 6 na pět jednotlivých segmentů. Aby se zamezilo možné záměně, byly vzorky označeny razídkem dle tabulky č. 7.

Tabulka č. 7 Přehled značení jednotlivých segmentů trubek

1.1	Žíhaný vzorek
2.1	Žíhaný vzorek
3.1	Nežíhaný vzorek
4.1	Nežíhaný vzorek



Obrázek č. 7 Schéma rozřezového plánu trubky

11.1 Příprava vzorků pro zkoušky makrostruktury

Na vzniklých plochách po nařezání segmentů byly provedeny výbrusy brusnými papíry zrnitosti od 80 až do 800 s následným přeleštěním povrchu. Poté byl povrch naleptán 15 % roztokem HNO_3 . Snímky makrostruktur byly provedeny při 2,5 násobném zvětšení.

11.2 Příprava vzorků pro zkoušky mikrostruktury a mikrotvrdosti

Vzorky byly po dokončení snímků makrostruktur opět vybroušeny brusnými papíry v rozmezí zrnitosti od 160 do 2500 a leštěny hlinitanovou leštící emulzí. Poté byly naleptány 4% roztokem HNO_3 . Snímky mikrostruktur byly pořízeny při 100 a 500 násobném zvětšení na optickém metalografickém mikroskopu Weiss-Neophot.

Zkoušky mikrotvrdosti se provádějí po zkouškách mikrostruktury, tedy příprava vzorků pro obě zkoušky je shodná. Pro měření byl použit mikrotvrdoměr LECO AMH 43.

11.3 Příprava vzorků pro zkoušky tvrdosti HV 10

Zkoušky tvrdosti HV 10 probíhaly v souladu s normou ČSN EN 1043-1. Pro měření tvrdosti byly vzorky vyleštěny, a v místě měření byly jehlou orýsovány. Pro měření tvrdosti byl použit tvrdoměr s nastavenou silou na HV10. Měření probíhalo za teploty 20°C.

11.4 Příprava vzorků pro zkoušky rázem v ohybu

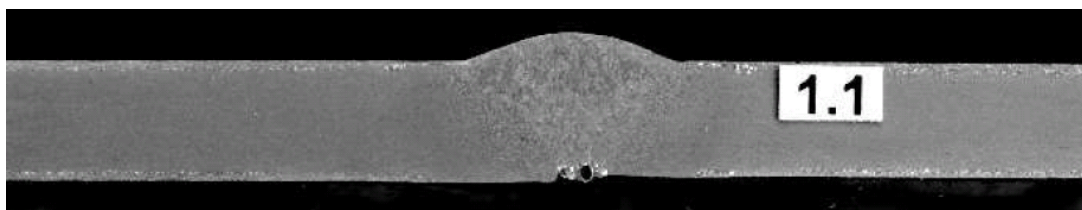
Příprava vzorků a zkoušení probíhalo v souladu s normami ČSN EN 10045-1 a ČSN EN ISO 6507-1. Zkoušky rázem v ohybu byly provedeny jen jako orientační a přeražen byl jen jeden kus zkušební tyče, který byl zhotoven třískovým obráběním z daného segmentu dané trubky. Z důvodu nedostatku materiálu nebylo možné vykonat zkoušky přesně podle normy, která vyžaduje sadu – (vždy 3 zkušební vzorky z každé trubky). Podle normy ČSN EN 10045-1 může být použit rozměr zkušební tyče 10mm x 5mm a délce 55mm. Zkoušky byly provedeny na kladivu o maximální energii 300J při teplotě zkoušení 20°C. Vrub byl umístěn ve svarovém kovu.

12. Vyhodnocení svarových spojů oceli 7CrMoVTiB10-10

12.1 Vzorek 1.1

Makrostruktura

Makrostruktura vzorku byla posouzena po naleptání 15% HNO₃.



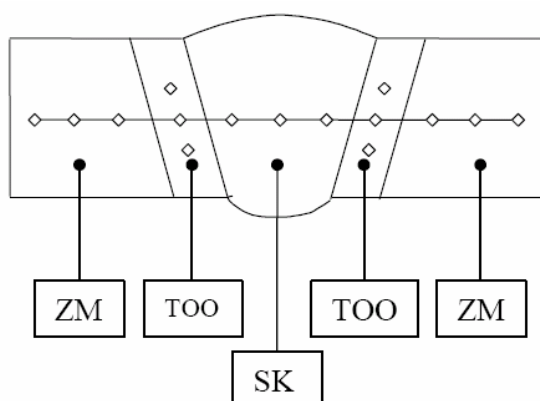
Obrázek č. 8 Zvětšeno 2,5x

Vzorek č:	Makrostruktura	TOO [mm]
1.1	studený spoj v kořeni, h = 0,5 mm, pór, h = 0,7	2,5

Mikrotvrdost HV 0.1

Mikrotvrdost HV 0,1 byla změřena pomocí mikrotvrdoměru LECO AMH 43 vždy v pěti oblastech příčného výbrusu každého vzorku (ZM – základní materiál, TOO – tepelně ovlivněná oblast a SK – svarový kov) – obrázek č. 9. Výsledky měření jsou uvedeny v následující tabulce:

Vz. č:	ZM			TOO			SK			TOO			ZM		
1.1	190	192	197	203	198	200	189	187	177	213	213	206	187	185	190



Obrázek č. 9 – umístění vpichů ve svaru

Mikrostruktura svarového spoje, vzorek 1.1

(žihán po svaření 760°C/2hod)
(lept. 4% HNO₃)

Obr. 10 svarový kov zv.100x



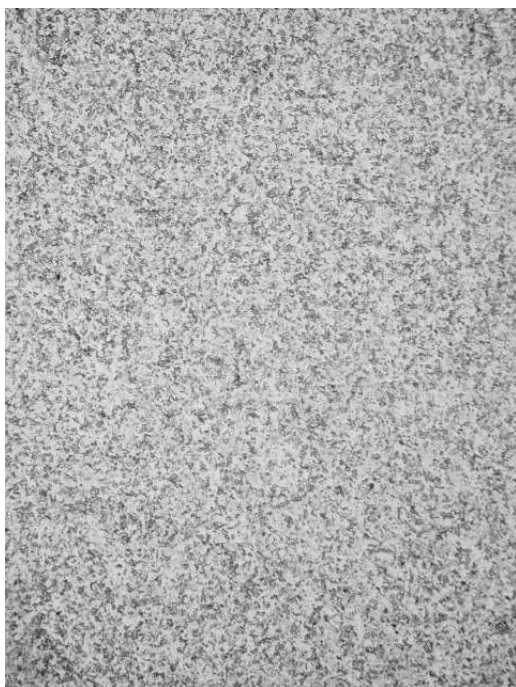
Mikrostruktura svarového kovu je tvořena feritem a bainitem obr. 10

Obr. 11 hranice ztavení zv.100x



Mikrostruktura základního materiálu u hranice ztavení je feriticko-bainitická obr. 11

Obr. 12 základní materiál zv.100x



Mikrostruktura základního materiálu je značně popuštěná – stupeň 2b, dle normy VGB-TW 507, tvořena feritem, bainitem a karbidy rozloženými uvnitř i na hranicích zrn obr. 12 a 13.

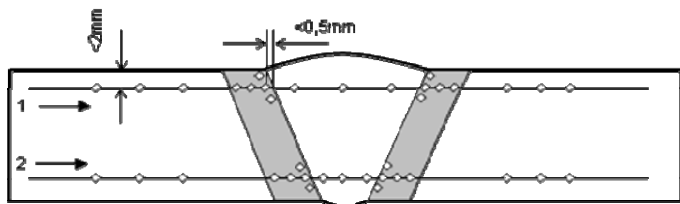
Obr. 13 detail k obr. 12 zv.500x



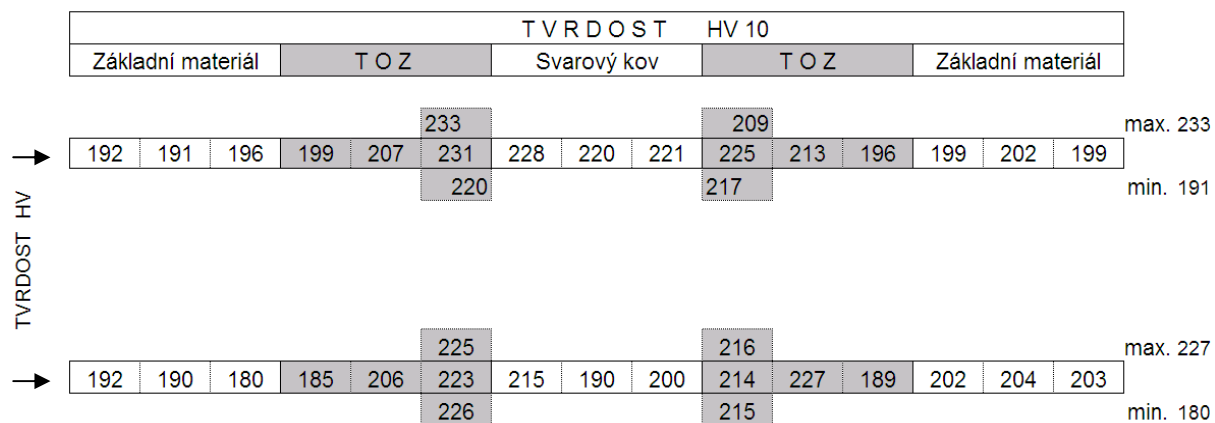
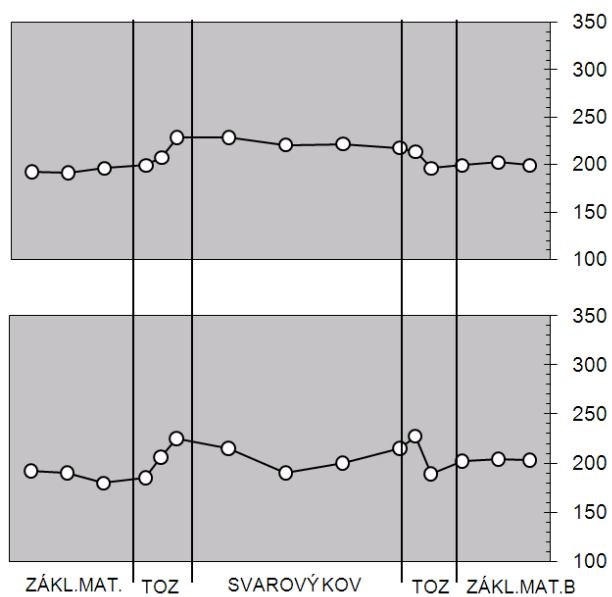
Zkoušky tvrdosti HV 10

Teplota měření tvrdosti 20°C

Vzorek 1.1



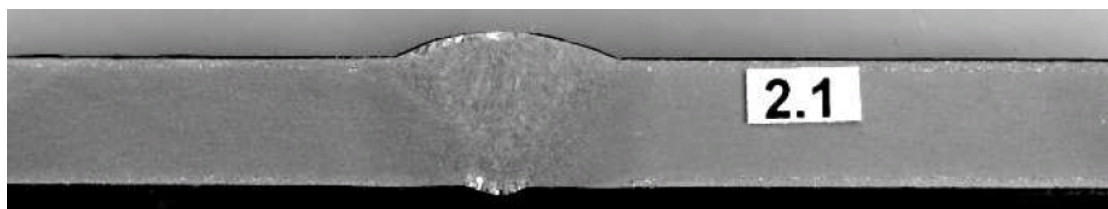
Obrázek č. 14 – umístění vpichů ve svaru



12.2 Vzorek 2.1

Makrostruktura

Makrostruktura vzorku byla posouzena po naleptání 15% HNO₃.



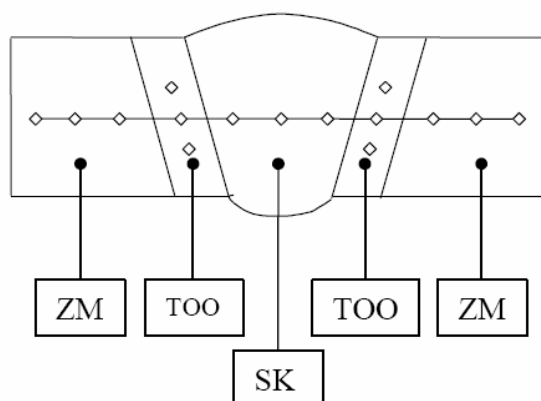
Obrázek č. 15 Zvětšeno 2,5x

Vzorek č:	Makrostruktura	TOO [mm]
2.1	bez vad	2,6

Mikrotvrdost HV 0.1

Mikrotvrdost HV 0,1 byla změřena pomocí mikrotvrdoměru LECO AMH 43 vždy v pěti oblastech příčného výbrusu každého vzorku (ZM – základní materiál, TOO – tepelně ovlivněná oblast a SK – svarový kov) – obrázek č. 16. Výsledky měření jsou uvedeny v následující tabulce:

Vz. č:	ZM			TOO			SK			TOO			ZM		
2.1	202	197	201	226	223	224	220	217	222	221	215	217	191	198	193



Obrázek č. 16 – umístění vpichů ve svaru

Mikrostruktura svarového spoje, vzorek 2.1

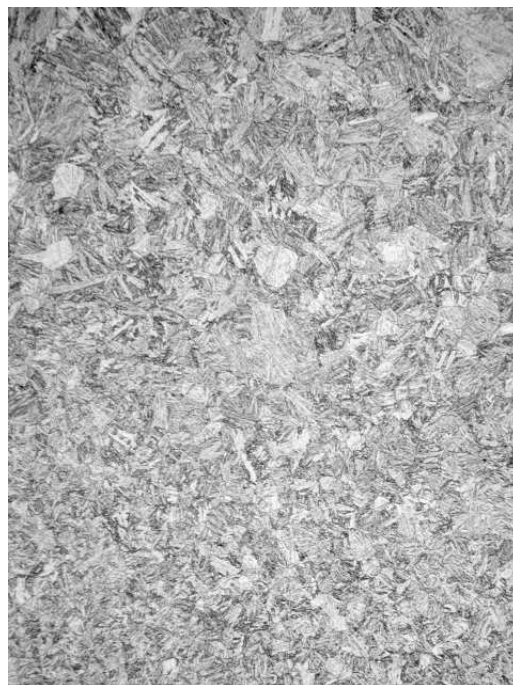
(žihán po svaření 760°C/2hod)
(lept. 4% HNO₃)

Obr. 17 svarový kov zv.100x



Mikrostruktura svarového kovu je tvořena feritem a bainitem obr. 17

Obr. 18 hranice ztavení zv.100x



Mikrostruktura základního materiálu u hranice ztavení je feriticko-bainitická obr. 18

Obr. 19 základní materiál zv.100x



Mikrostruktura základního materiálu je značně popuštěná – stupeň 2b, dle normy VGB-TW 507, tvořena feritem, bainitem a karbidy rozloženými uvnitř i na hranicích zrn obr. 19 a 20.

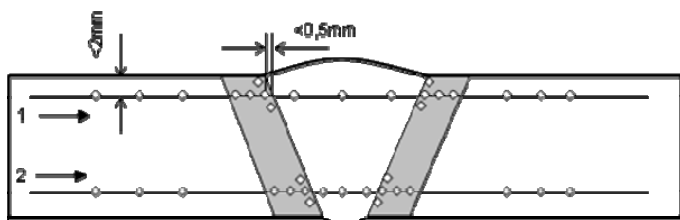
Obr. 20 detail k obr. 19 zv.500x



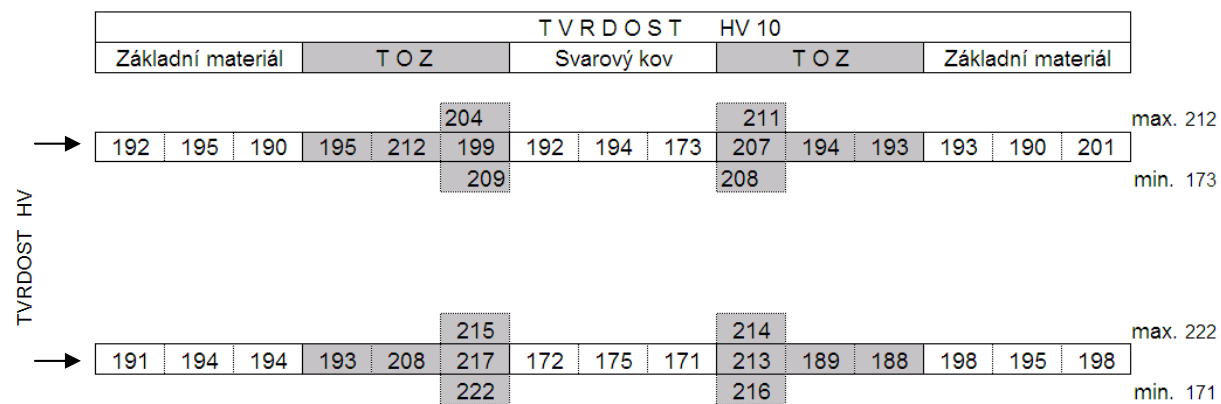
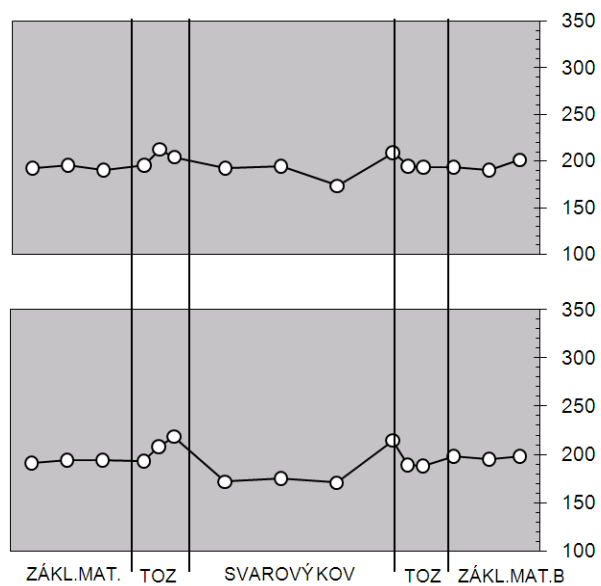
Zkoušky tvrdosti HV 10

Teplota měření tvrdosti 20°C

Vzorek 2.1



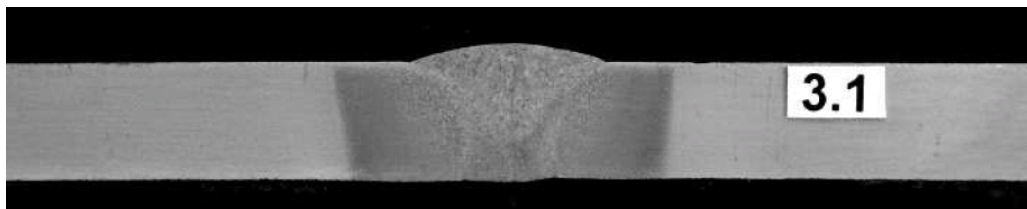
Obrázek č. 21 – umístění vpichů ve svaru



12.3 Vzorek 3.1

Makrostruktura

Makrostruktura vzorku byla posouzena po naleptání 15% HNO₃.



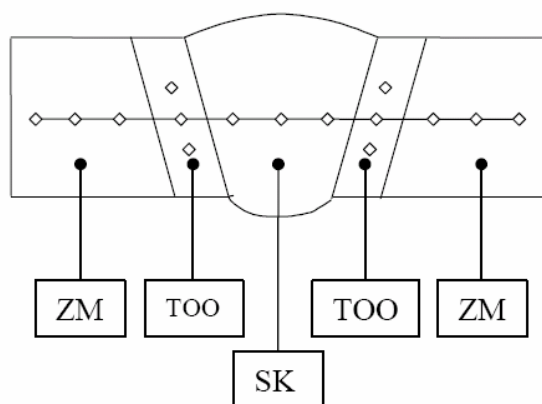
Obrázek č. 22 Zvětšeno 2,5x

Vzorek č:	Makrostruktura	TOO [mm]
3.1	bez vad	5,1

Mikrotvrdost HV 0.1

Mikrotvrdost HV 0,1 byla změřena pomocí mikrotvrdoměru LECO AMH 43 vždy v pěti oblastech příčného výbrusu každého vzorku (ZM – základní materiál, TOO – tepelně ovlivněná oblast a SK – svarový kov) – obrázek č. 23. Výsledky měření jsou uvedeny v následující tabulce:

Vz. č:	ZM			TOO			SK			TOO			ZM		
3.1	222	226	229	341	339	335	329	322	326	325	329	322	225	221	226



Obrázek č. 23 – umístění vpichů ve svaru

Mikrostruktura svarového spoje, vzorek 3.1

(vzorek nežihán)
(lept. 4% HNO₃)

Obr. 24 svarový kov zv.100x



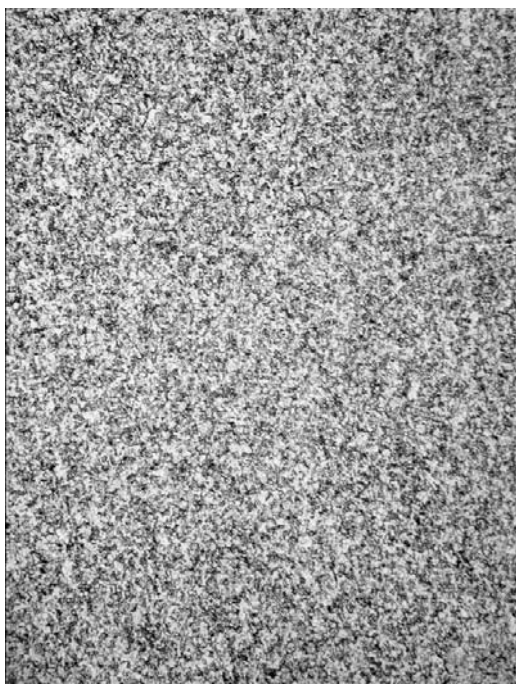
Mikrostruktura svarového kovu je tvořená feritem a bainitem obr. 24

Obr. 25 hranice ztavení zv.100x



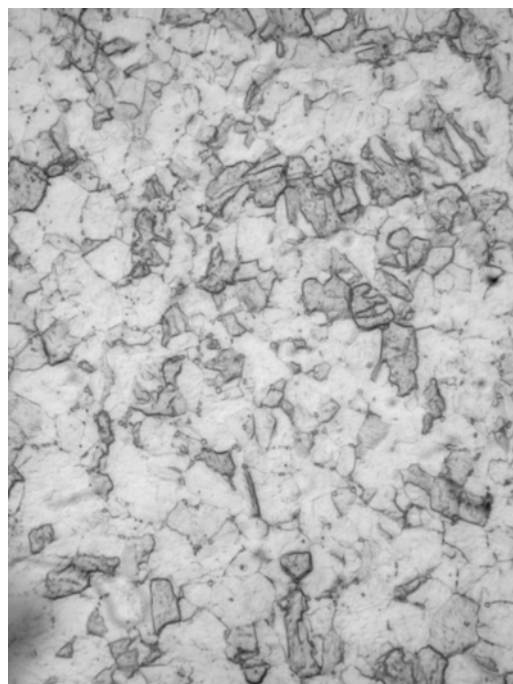
Mikrostruktura základního materiálu u hranice ztavení je feriticko-bainitická obr. 25

Obr. 26 základní materiál zv.100x



Mikrostruktura základního materiálu je popuštěná – stupeň 2a, dle normy VGB-TW 507, tvořena feritem, bainitem a karbidy rozloženými uvnitř i na hranicích zrn obr. 26 a 27.

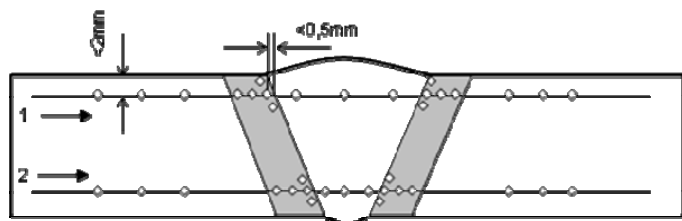
Obr. 27 detail k obr. 26 zv.500x



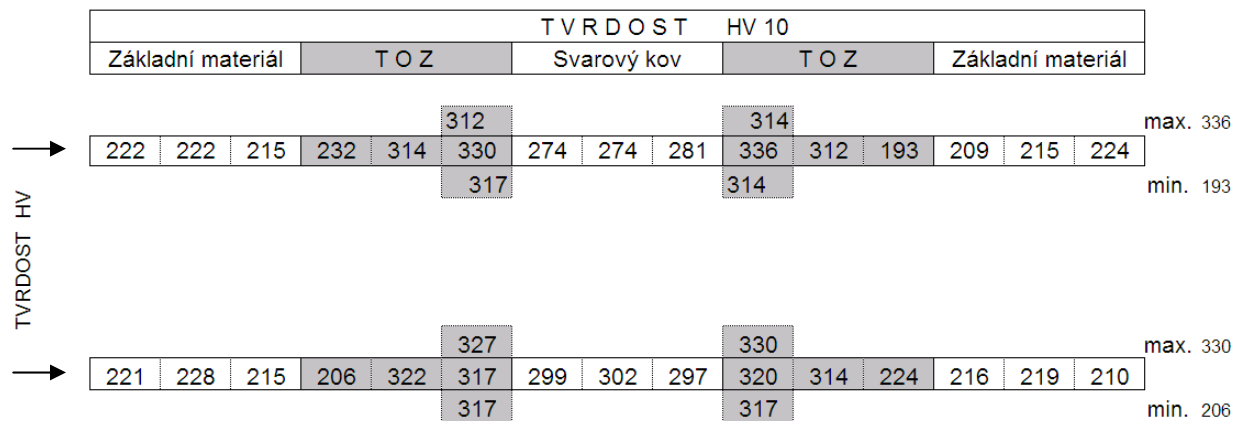
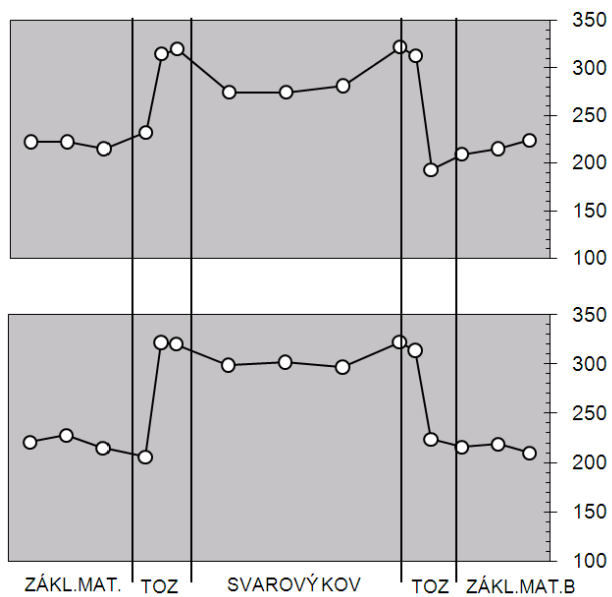
Zkoušky tvrdosti HV 10

Teplota měření tvrdosti 20°C

Vzorek 3.1



Obrázek č. 28 – umístění vpichů ve svaru



12.4 Vzorek 4.1

Makrostruktura

Makrostruktura vzorku byla kontrolována po naleptání 15% HNO₃.



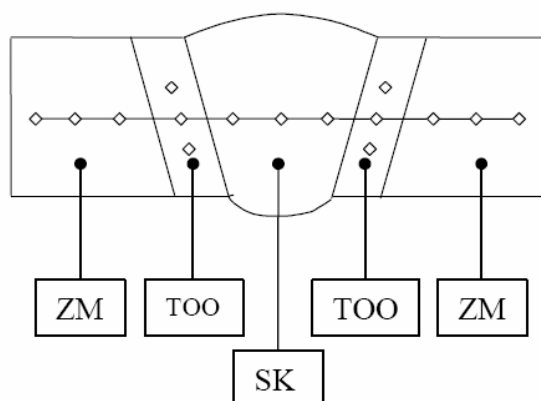
Obrázek č. 29 Zvětšeno 2,5x

Vzorek č:	Makrostruktura	TOO [mm]
4.1	souvislý zápal h = 0,2 mm	6,8

Mikrotvrdost HV 0.1

Mikrotvrdost HV 0,1 byla změřena pomocí mikrotvrdoměru LECO AMH 43 vždy v pěti oblastech příčného výbrusu každého vzorku (ZM – základní materiál, TOO – tepelně ovlivněná oblast a SK – svarový kov) – obrázek č. 30. Výsledky měření jsou uvedeny v následující tabulce:

Vz. č:	ZM			TOO			SK			TOO			ZM		
4.1	210	213	208	223	242	242	315	303	307	286	300	280	201	199	206



Obrázek č. 30 – umístění vpichů ve svaru

Mikrostruktura svarového spoje, vzorek 4.1

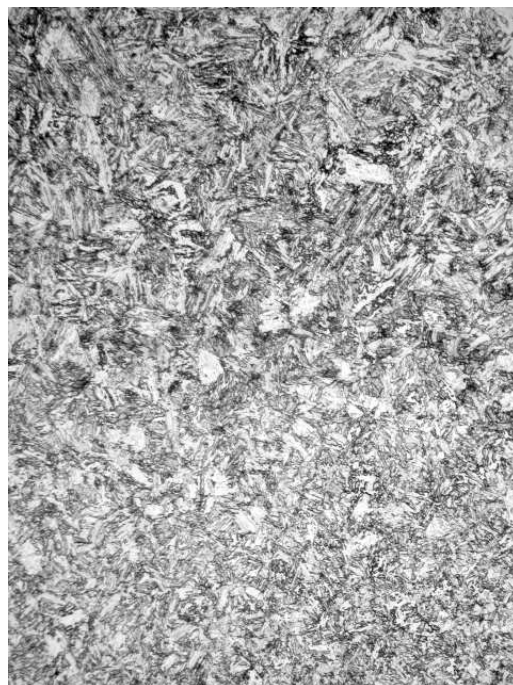
(vzorek nežihán)
(lept. 4% HNO₃)

Obr. 31 svarový kov zv.100x



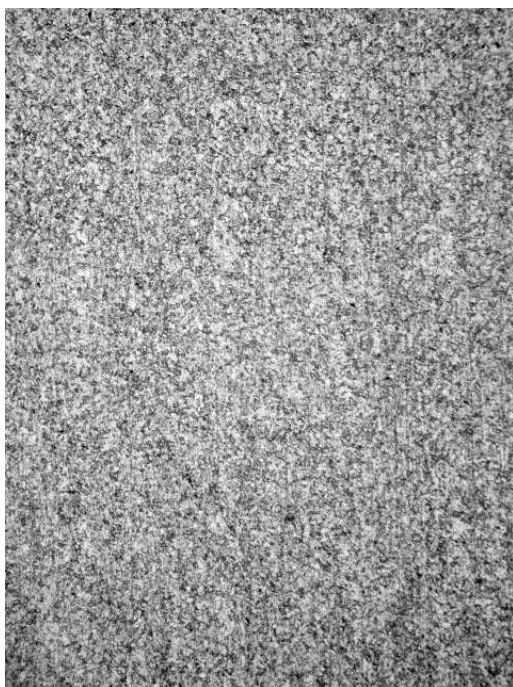
Mikrostruktura svarového kovu je tvořená feritem a bainitem obr. 31

Obr. 32 hranice ztavení zv.100x



Mikrostruktura základního materiálu u hranice ztavení je feriticko-bainitická obr. 32

Obr. 33 základní materiál zv.100x



Mikrostruktura základního materiálu je popuštěná – stupeň 2a, dle normy VGB-TW 507, tvořena feritem, bainitem a karbidy rozloženými uvnitř i na hranicích zrn obr. 33 a 34.

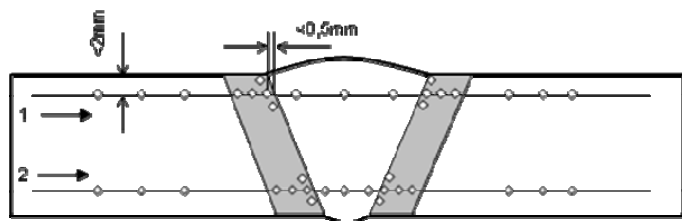
Obr. 34 detail k obr. 33 zv.500x



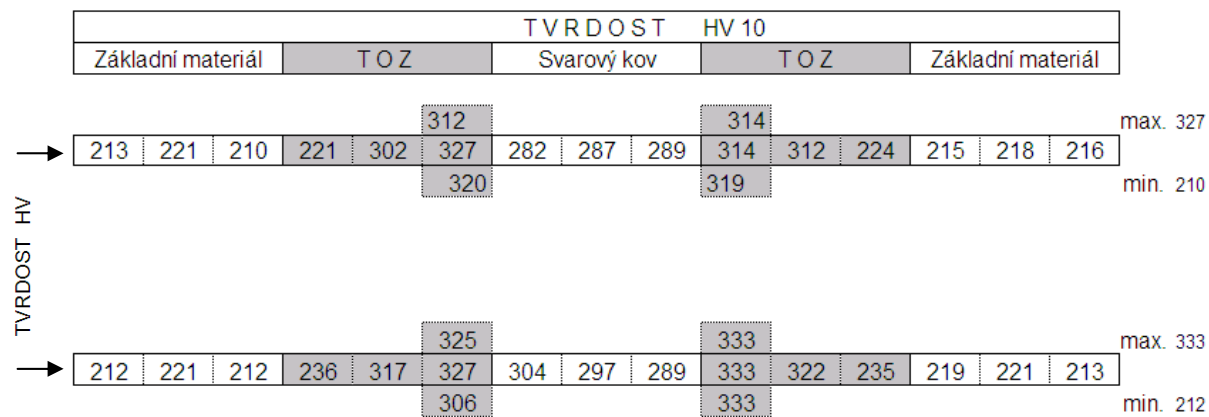
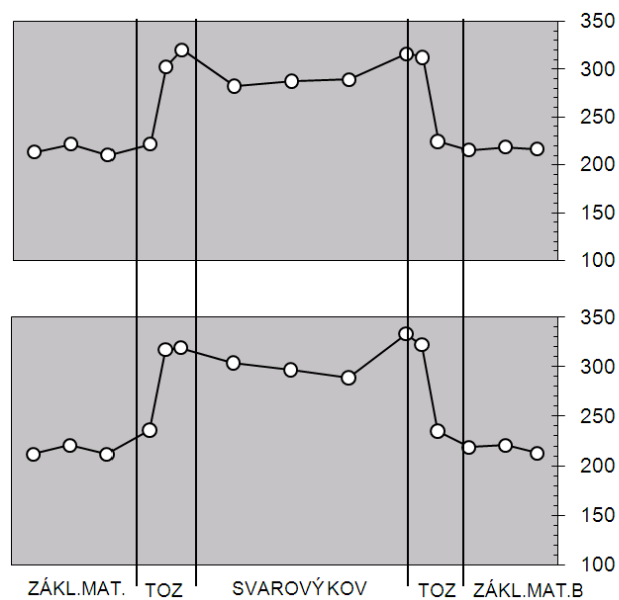
Zkoušky tvrdosti HV 10

Teplota měření tvrdosti 20°C

Vzorek 4.1



Obrázek č. 35 – umístění vpichů ve svaru



12.5 Zkoušky rázem v ohybu

Tabulka č. 8 Přehled záznamů o zkoušce rázem v ohybu

	Typ tyče	Zkušební teplota	Nárazová práce [J]	Poznámka
1.1	---	---	---	Zkoušku nebylo možné provést z důvodu defektu v kořeni svaru a nedostatečné tloušťky stěny pláště pro odebrání bezchybného vzorku.
2.1	KV 300/5	20°C	110	---
3.1	KV 300/5	20°C	8	---
4.1	KV 300/5	20°C	9	---

13. Diskuse dosažených výsledků

Cílem práce bylo porovnání mechanických vlastností svarových spojů nízkolegované žárovevné oceli 7CrMoVTiB10-10. Z důvodu dosažení jednoznačných vyhovujících výsledků, byly dvě trubky vyžihány, žiháním na snížení pnutí a dvě trubky byly ponechány bez tepelného zpracování.

Po svaření zkušebních spojů a vyhodnocení výsledků lze konstatovat:

Makrostruktura

Z jednotlivých snímků makrostruktur, kdy nebyl kořen svaru zcela bez vad a byly zde zřejmé místní póry, studené spoje a zápaly, lze přisuzovat tyto vady nízké teplotě předehřevu, kdy při 100°C bylo obtížné provařit kořen bezchybně. Tento problém by mělo vyřešit zvýšení teploty předehřevu na cca 150°C. Při této teplotě předehřevu i při zachování stejných parametrů svařování a stejné zručnosti svářeče by měla být svarová lázeň lépe tvarovatelná a kořen svaru bez vad. Na snímcích makrostruktur jsou vidět rozdílné tloušťky TOO, které byly způsobeny rozdílnou rychlostí svařování a z toho plynoucím rozdílným tepelným příkonem.

Mikrostruktura

Rozbor mikrostruktury potvrdil, že se jedná o strukturu perliticko – bainitickou u všech zkušebních spojů, což je z hlediska žárovevnosti vyhovující. Tento fakt potvrzuje, že zvolený teplotní režim svařování je vyhovující. Na snímcích mikrostruktur se potvrdilo zhrubnutí zrna v TOO, linii ztavení a ve svarovém kovu oproti základnímu materiálu. U svarů, které nebyly tepelně zpracované, je vidět méně popuštěná struktura s jasnými jehlicemi bainitu, u kterých se dají předpokládat horší mechanické vlastnosti, např. vysoká hodnota tvrdosti a nízké hodnoty nárazové práce při zkouškách rázem v ohybu. Tyto předpoklady byly potvrzeny v tabulce č. 8 a v záznamech o měření tvrdosti. Naopak tepelně zpracované svary vykazují popuštěnou strukturu, což by mělo zaručit dostatečné vyprecipitování jemné disperze karbidické fáze a zamezit dodatečnému sekundárnímu vytvrzování. Přitom by měly poklesnout hodnoty tvrdosti a zvýšit se hodnoty nárazové práce při zkouškách rázem v ohybu. Všechny tyto předpoklady se potvrdily, viz tabulka č. 8 a záznamy o zkouškách tvrdosti. Dle normy VGB-TW 507 lze vzorky zařadit podle stupně degradace creepových materiálů (obr. mikrostruktur).

Mikrotvrdost HV 0,1

Zkouškami mikrotvrdosti byly zdokumentovány tvrdosti na linii ztavení, která se běžným tvrdoměrem nedá přesně zachytit. Naměřené hodnoty se příliš neliší od hodnot tvrdosti HV10, což potvrzuje shodnou mikrostrukturu v celém rozsahu TOO.

Tvrdost HV10

Měření tvrdosti probíhalo v souladu s normou ČSN EN ISO 15614-1. V této normě je předepsáno, aby maximální hodnoty tvrdosti svarových spojů oceli skupiny 6 dle CEN ISO/TR 15 608 byly max. 350 HV10. Tento požadavek byl splněn, což naznačuje, že zvolený teplotní režim svařování je vyhovující. Výsledky hodnot měření tvrdosti ukazují, že svarové spoje nízkolegovaných ocelí musejí být po svařování popouštěny z hlediska snížení tvrdosti a zlepšení mechanických vlastností. Průběhy tvrdosti jednotlivých svarů jsou zobrazeny v záznamech o měření tvrdosti.

Zkoušky rázem v ohybu

Tyto zkoušky měly prokázat, jak zásadní vliv má popuštění na mechanické vlastnosti svarových spojů u nízkolegovaných ocelí skupiny 6 dle ČSN EN ISO 15608. Výsledky jsou zobrazeny v tabulce č. 8. U nevyžíhaných vzorků je hodnota mechanické práce vyvinutá na přeražení zkušební tyče bezmála 13x nižší. Z tohoto faktu vyplývá, že vypuštění tepelného zpracování na snížení pnutí je nepřípustné.

14. Závěr

Moderní nízkolegované žárovevné oceli na bázi 2-3 % Cr, jako je ocel 7CrMoVTiB10-10 (T24), jsou určeny pro výrobu membránových stěn kotlů s nadkritickými parametry páry. Jsou vystaveny tlaku přes 260 bar a teplotě 600°C. Proto jsou na svarové spoje těchto ocelí kladeny vysoké nároky na mechanické vlastnosti, ale také je zde požadována patřičná odolnost proti tečení a sekundárnímu vytvrzování. Experimentální část byla zaměřena na sledování mechanických vlastností v závislosti na dosažené struktuře svarových spojů a TOO s následným tepelným zpracováním a bez něj.

Svarové spoje, které nebyly tepelně zpracované, vykazovaly skokově vyšší hodnoty tvrdosti v oblastech TOO a svarového kovu. Následné zkoušky vrubové houževnatosti potvrdily výrazný až třináctinásobný pokles plasticity materiálu a s tím i souvisejícího rizika křehkého lomu. Navíc zde bez tepelného zpracování hrozí riziko sekundárního vytvrzení během provozu za zvýšené teplotní expozice, vlivem nedostatečné precipitace disperzních částic MX.

Oproti tomu tepelně zpracované svarové spoje vykazovaly srovnatelné hodnoty tvrdosti základního materiálu, TOO a svarového kovu. Vrubová houževnatost u vyžíhaných svarů byla podstatně vyšší než u nepopuštěných a během tepelného zpracování, které bylo dle zkušeností teplotně zvoleno v úzké oblasti za hranicí kritického minima vytvrzení a pod teplotou přeměny A_{c1} , došlo k vyprecipitování částic jemné disperze karbidů MX. Tato precipitace je důležitá z hlediska možného pozdějšího nežádoucího sekundárního vytvrzení.

Shrnutí dosažených výsledků této diplomové práce vede jednoznačně k závěru, že mají-li být svarové spoje z hlediska mechanických, žárovevných a strukturních vlastností vyhovující, musí teplota předehřevu pro vyhovující svary v kořeni být minimálně 150°C, interpass do 220°C, parametry svařování jsou vyhovující, viz „Specifikace postupu svařování“, dohřev 200°C po dobu dvou hodin a následně musí být svary tepelně zpracovány žíháním na snížení pnutí v rozsahu teplot 750°C – 760°C po dobu 2 hodin. Tento technologický postup svařování metodou 141 - (GTAW) a přídatným materiálem UNION 24 I, povede k vyhovujícím mechanickým a strukturním vlastnostem svarových spojů oceli 7CrMoVTiB10-10.

Výsledky této diplomové práce jsou v současné době využívány pro provádění praktických zkoušek na reálném zařízení.

15. Použitá literatura:

- [1] KOLEKTIV AUTORŮ. *Materiály a jejich svařitelnost*. Svářečské nakladatelství ZEROSS, Ostrava, leden 2001
- [2] FREMUNT, P., PODRÁBSKÝ, T. *Konstrukční oceli*. Brno, Akademické nakladatelství CERM s.r.o 1996
- [3] PURMENSKÝ, J., FOLDYNA, V. *Význam žárovevnosti pro životnost energetických zařízení*. In Sborník - Nové materiály, technologie a zařízení pro svařování, Ostrava, 2008, s. 155 – 165. ISBN 978-80-248-1825-2
- [4] FOLDYNA, V., KOUKAL, J., *Vývoj nových ocelí pro energetiku a chemické strojírenství na bázi 2 až 3 % Cr*, Ostrava
- [5] MOHYLA, P., KOUKAL, J. *Svařitelnost perspektivních nízkolegovaných žárovevných ocelí*. In Sborník konference TechMat 04, 9. 11. 2004, Česká Třebová. Pardubice, TU Pardubice, 2004, s. 96-101. ISBN 80-7194-707-5.
- [6] KUČERA, J. *Teorie svařování*. VŠB-TU Ostrava 1991
- [7] YAMADERA, Y., OKADA, K., IGARASHI, M., MASUYAMA, F., TOKOYAMA, T., KOMAI, N., *Development of 0,06 C – 2,25 Cr – 1,6 W – v – Nb Steel (HCM 2S) for large Diameter and thick wall pipe*. Materiály Sumimoto Metal Industries, Ltd.
- [8] HLAVATÝ, J. *Vliv teploty předehřevu na vlastnosti svarových spojů oceli T24*, In Sborník - Nové materiály, technologie a zařízení pro svařování, Ostrava, 2008, s. 197 – 204. ISBN 978-80-248-1825-2
- [9] MOHYLA, P., KOUKAL, J. *Vliv mikrostruktury na mechanické vlastnosti svarových spojů oceli T24*. In Sborník Nové materiály, technologie a zařízení pro svařování: 19 - 21. 9. 2005, Ostravice. Ostrava: Český svářečský ústav s.r.o., 2005, s. 175-180. ISBN 80-248-0898-6.
- [10] PURMENSKÝ, J., FOLDYNA, V. *Strukturní stabilita CrMoV nízkolegovaných žárovevných ocelí*, Mariánské lázně, říjen – listopad 1973
- [11] MASUYAMA, F., *New Developments in Steels for Power Generation Boilers*, In Advanced Heat Resistant Steels for Power Generation, R. VISWANATHAN and J.W.
- [12] STRNADEL, B. *Nauka o materiálu 2 – Degradční procesy a design konstrukčních materiálů*, VŠB-TU Ostrava 2008
- [13] PURMENSKÝ, J. *Strukturní stabilita CrMo a CrMoV oceli a její vliv na životnost energetických a chemických zařízení*, doktorská disertační práce, UFM-ČSAV Brno, 1992

- [14] FOLDYNA, V aj.: *The role of Mo and W on the creep properties of 3 and 9 % chromium steels*. In Sborník METAL 2002, Tanger, 2002, No.138 (CD ROM)
- [15] ČSN 05 1309. *Zváranie. Zvariteľnosť kovov a jej hodnotenie: všeobecné ustanovenia*. Praha: Federální úřad pro normalizaci a měření, 1990, 28 s. 1990.